



BRIN

BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL



Hilmy Prilliadi

RANTAI PASOK PANGAN BERKELANJUTAN DENGAN PENERAPAN TEKNOLOGI INDUSTRI 4.0

Buku ini tidak diperjualbelikan.

RANTAI PASOK PANGAN BERKELANJUTAN DENGAN PENERAPAN TEKNOLOGI INDUSTRI 4.0



Buku ini tidak diperjualbelikan.

Diterbitkan pertama pada 2022 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution Non-commercial Share Alike 4.0 International license (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC-BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Hilmy Prilliadi

RANTAI PASOK PANGAN BERKELANJUTAN DENGAN PENERAPAN TEKNOLOGI INDUSTRI 4.0



Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2022 Hilmy Prilliadi

Katalog dalam Terbitan

Rantai Pasok Pangan Berkelanjutan dengan Penerapan Teknologi Industri 4.0/Hilmy Prilliadi–
Jakarta: Penerbit BRIN, 2022.

xxvi + 588 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-623-8052-16-5 (*e-book*)

1. Rantai Pasok Pangan
2. *Internet of Things*
3. Teknologi Industri 4.0

664




Copy editor : Risma Wahyu Hartiningsih
Proofreader : Sonny Heru Kusuma & Sarah Fairuz
Penata Isi : Hilda Yunita
Desainer Sampul : Meita Safitri

Cetakan : November 2022

Diterbitkan oleh:

Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: 0811-8612-369
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id



 PenerbitBRIN
 Penerbit_BRIN
 penerbit_brin



DAFTAR ISI

Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel	xiii
Pengantar Penerbit	xv
Kata Pengantar	xvii
Prakata	xix
Bab 1 Pasokan Pangan yang Tangguh, Berkelanjutan, dan Sehat ...1	
A. Peran Penting Pasokan Pangan	1
B. Ketahanan dan Kerentanan Pangan: Pelajaran dari Pandemi Global	5
C. Produksi Pangan dan Keberlanjutan	13
D. Keamanan Pangan.....	23
E. Langkah Realisasi	28
Bab 2 Pengantar Industri 4.0 dan Keberlanjutan	31
A. Konsep Industri 4.0 dan Keberlanjutan	31
B. Menuju Industri 4.0: Mengaktifkan Teknologi	35
C. Hubungan antara Industri 4.0 dan Keberlanjutan	39
D. Industri 4.0 dan Praktik Keberlanjutan.....	46

E.	Industri 4.0 dan Kinerja Keberlanjutan	48
F.	Fungsi Keberlanjutan Industri 4.0.....	55
G.	Memaksimalkan Potensi Teknologi Industri 4.0	65
BAB 3	Penerapan Teknologi Industri 4.0 dalam Rantai Pasok	69
A.	Potensi Industri 4.0 untuk Manajemen Rantai Pasok	69
B.	Aplikasi Industri 4.0 untuk Manajemen Rantai Pasok Sirkular.....	78
C.	Pengenalan <i>Food Supply Chain</i> dan <i>Short Food Supply Chain</i>	83
D.	Perbedaan FSC dan SFSC.....	87
E.	Konvergensi dan Divergensi antara FSC dan SFSC.....	92
F.	Rantai Pasok Pangan dan Teknologi untuk Pertanian Masa Depan	109
G.	Bagaimana Teknologi Digital Mengubah Rantai Pasok Pangan.....	116
H.	Model Baru Rantai Pasok Pertanian Pangan	120
Bab 4	<i>Internet of Things</i> (IoT) dalam Rantai Pasok Pangan.....	127
A.	Menjaga Kualitas dan Ketertelusuran Pangan.....	127
B.	Tinjauan Umum tentang IoT.....	131
C.	Peluang Penerapan IoT pada <i>Sustainable Supply Chain</i> (SSC)	143
D.	Aplikasi <i>Internet of Things</i> dalam Manajemen Rantai Pasok Hasil Pertanian	145
E.	Mengembangkan Teknologi Logistik Modern dan Meningkatkan Kualitas Manajemen Keselamatan.....	147
F.	<i>Internet of Things</i> untuk Transparansi dan Ketertelusuran Rantai Pasok Pangan	148
G.	Arsitektur	153
H.	Implementasi Platform IoT untuk FSC.....	157
I.	Mengintegrasikan <i>Internet of Things</i> dalam Rantai Pasok Pangan Halal.....	161
J.	Tantangan IoT dalam HFSC	169
Bab 5	Kemunculan Teknologi <i>Blockchain</i> dalam Pertanian dan Rantai Pasok Pangan.....	173
A.	Manfaat <i>Blockchain</i> dalam Rantai Pasok Pangan.....	173
B.	<i>Blockchain</i> dalam Pertanian dan Rantai Pasok Pangan.....	181
C.	Model Sistem	191
D.	Implikasi Manajerial	199

	E. <i>Blockchain</i> Berkelanjutan untuk Rantai Pasokan Pangan Halal	202
	F. Kerangka Kerja <i>Blockchain</i> untuk UKM Pangan Halal.....	208
	G. Pengaktif Utama <i>Blockchain</i> Halal di Rantai Pasok UKM	217
Bab 6	<i>Big Data</i> dan Rantai Pasok Pangan	223
	A. Integrasi Informasi Pangan melalui <i>Big Data</i>	223
	B. Masalah Pergudangan Produk Pertanian.....	225
	C. Solusi <i>Big Data</i>	231
	D. Mengintegrasikan <i>Big Data</i> ke dalam Rantai Pasok Pangan....	233
	E. Aplikasi <i>Big Data</i> untuk Manajemen Keberlanjutan Rantai Pasok Produk Sampingan	242
Bab 7	Kecerdasan Buatan dalam Rantai Pasok dan Sistem Pangan	261
	A. Kecerdasan Buatan dalam Sistem Pangan	261
	B. Memikirkan Kembali Model Bisnis Berkelanjutan dalam Skenario Covid-19.....	280
Bab 8	Sistem <i>Smart Packaging</i> (Kemasan Pintar).....	291
	A. Peluang dan Tantangan Kemasan Pintar	291
	B. Peran Sistem Kemasan Pintar	304
	C. Kemasan Pangan dan Nanoteknologi: Menjaga Kesehatan dan Keselamatan Konsumen	319
Bab 9	Teknologi Anti Pemalsuan (<i>Anti-Counterfeiting</i>).....	331
	A. Mengembangkan Tindakan Anti-pemalsuan	331
	B. Teknologi Pengemasan Anti-pemalsuan	354
	C. Pemalsuan Pangan: Kekhawatiran yang Bertumbuh	364
	D. Studi Kasus: Albania dan Indonesia	373
Bab 10	Penerapan Teknologi <i>Drone</i> Pertanian.....	385
	A. Potensi dan Tantangan	385
	B. Produksi Cerdas dengan Penggunaan <i>Drones</i> dan IoT.....	390
	C. IoT Bertindak sebagai Tulang Punggung dalam Mengatasi Masalah Covid-19 di Pertanian.....	397
	C. Inovasi Layanan Pesan-Antar Pangan Menggunakan <i>Drone</i> Pasca-Merebaknya Covid-19.....	402
Bab 11	Peran Teknologi Robotika dan Sistem Otonom.....	417
	A. Menyambut Robotika dan Sistem Otonom.....	417

B.	Aplikasi RAS dalam Bidang Pertanian dan Pangan.....	418
C.	Peran RAS	426
D.	Robot untuk Distribusi Pangan dan Kebutuhan selama Pandemi	431
E.	Aturan Hukum untuk Robot Pengiriman Mil Terakhir	438
Bab 12	Printer Pangan 3 Dimensi	465
A.	Cara Baru Mengolah Pangan	465
B.	Teknologi 3DP dalam Pencetakan Pangan	475
C.	Multi Bahan dan Multi Kepala Cetak	480
D.	Dampak Pencetakan Pangan 3D	482
E.	Tantangan dalam Pencetakan Pangan 3D.....	488
F.	Sikap Konsumen terhadap Pencetakan 3D.....	489
Bab 13	Menyambut Masa Depan Pasokan Pangan Dunia.....	491
A.	Industri 4.0 dan Keberlanjutan.....	491
B.	Kolaborasi Antarteknologi.....	496
	Daftar Pustaka.....	507
	Daftar Singkatan	567
	Glosarium.....	571
	Indeks	581
	Biografi Penulis	587



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Inovasi teknologi untuk mengatasi tantangan utama dalam menciptakan pasokan pangan berlimpah, tangguh, sehat, dan berkelanjutan	2
Gambar 1.2	Penerapan Pertanian Vertikal	11
Gambar 2.1	Tipe Hubungan antara Keberlanjutan dan Ekonomi Sirkular.....	42
Gambar 4.1	Tantangan Utama bagi Organisasi Rantai Pasok.....	128
Gambar 4.2	Evolusi IoT	132
Gambar 4.3	Bidang Penerapan IoT.....	133
Gambar 4.4	Kerangka penilaian SSCM untuk industri 4.0	142
Gambar 4.5	IoT dan <i>Blockchain</i> untuk Rantai Pasok Pangan.....	150
Gambar 4.6	IoT yang Mendukung Blockchain untuk Rantai Pasok Pangan	153
Gambar 4.7	Komponen Modul Sensor.....	157
Gambar 4.8	Diagram Alir Aplikasi Seluler Android.....	158
Gambar 4.9.	Diagram Alir Modul Sensor dan Server Web.....	159
Gambar 5.1	Solusi ujung ke ujung berbasis blockchain untuk rantai pasok agri-food.....	193

Gambar 5.2	Mekanisme Perdagangan dan Pengiriman.....	195
Gambar 5.3	Sistem Reputasi.....	197
Gambar 6.1	Penyebab penderitaan para petani	227
Gambar 6.2	Siklus manajemen siber-fisik dari <i>Smart Farming</i> ditingkatkan dengan penyimpanan berbasis cloud dan manajemen data.....	230
Gambar 6.3	Big Data dan Pergudangan Bernilai tambah.....	232
Gambar 6.4	Kerangka Kerja untuk Mengintegrasikan Keamanan <i>Big Data</i> ke dalam Rantai Pasok Pangan	238
Gambar 6.5	Algoritma pemrosesan yang diusulkan untuk analisis <i>big data</i> dalam rantai pasok pertanian pangan	240
Gambar 6.6	<i>Big Data</i> dan penilaian keberlanjutan untuk valorisasi produk sampingan pertanian	249
Gambar 6.7	Berbagai langkah dalam pendekatan	249
Gambar 8.1	Tantangan dan Peluang Pengemasan Cerdas	297
Gambar 8.2	Kehilangan Pangan di Setiap Tahap Rantai Pasok (Gabungan AS, Kanada, Australia, dan Selandia Baru)	308
Gambar 8.3	Strategi IKEA yang digunakan dalam Inisiatif Limbah Pangan “Food is Precious”	308
Gambar 9.1	Faktor Pendorong Pemalsuan	357
Gambar 9.2	Botol dengan hologram sebagai fitur keamanan	359
Gambar 9.3	Fitur Bukti Kerusakan Eksternal dan Internal.....	362
Gambar 9.4	Label yang Meninggalkan Tanda Kosong Pada Gangguan.....	363
Gambar 10.1	Contoh Drone untuk Produksi Pertanian	390
Gambar 10.2	Contoh <i>drone</i> Uber Eats untuk Pengiriman Pangan ...	406
Gambar 11.1	Alur Proses Berbelanja Bahan Pangan	434
Gambar 11.2	Pikap Tepi Jalan.....	435
Gambar 11.3	Alur Proses Pemesanan dan Pengiriman Tepi Jalan....	435
Gambar 11.4	Alur Proses Pengiriman Pesanan ke Rumah.....	437
Gambar 12.1	Platform Pencetakan Pangan (kiri) dan Kepala Cetaknya (kanan)	472
Gambar 12.2	<i>Selective Laser Sintering</i> (kiri) dan <i>Selective Hot Air Sintering</i> (kanan)	477

Gambar 12.3	<i>Hot Melt Extrusion (FDM)</i>	478
Gambar 12.4	Desain Makanan Multibahan (atas) dan Sampel Fabrikasi (bawah)	481

Buku ini tidak diperjualbelikan.



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Potensi dampak ekonomi dalam mengadopsi teknologi baru pada industri pangan dan pertanian.....	3
Tabel 2.1	Teknologi Keamanan Siber.....	38
Tabel 2.2	Perbedaan antara Keberlanjutan dan Ekonomi Sirkular.....	41
Tabel 3.1	Perbedaan SFSC dan FSC.....	95
Tabel 4.1.	Implementasi IoT di Berbagai Industri.....	135
Tabel 4.2	Teknologi pendukung utama IoT dan aplikasinya.....	140
Tabel 8.1	Perbandingan Metode Fabrikasi Pencetakan Utama untuk Sistem Pengemasan Cerdas.....	317
Tabel 9.1	Insiden Pemalsuan	332
Tabel 9.2	Tipologi Peniru dan Pemalsu.....	336
Tabel 9.3	Faktor Sosial Ekonomi yang Memengaruhi Pemalsuan.....	340
Tabel 9.4	Berbagai Jenis Tindakan Anti-pemalsuan.....	343
Tabel 9.5	Obat sebagai Target Pemalsuan	356
Tabel 9.6	Kasus Pemalsuan Obat.....	356

Tabel 9.7.	Keuntungan dan kerugian dari teknologi terbuka dan tertutup.....	360
Tabel 9.8	Pilihan Solusi Anti-pemalsuan pada Tingkat Kemasan yang Berbeda.....	363
Tabel 10.1	Jenis Perangkat dalam Drone.....	399
Tabel 12.1	Ringkasan Desain Konseptual pada Printer Pangan....	468
Tabel 12.2	Perbandingan Teknologi 3DP dalam Pencetakan Makanan	480



PENGANTAR PENERBIT

Sebagai penerbit ilmiah, Penerbit BRIN mempunyai tanggung jawab untuk terus berupaya menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Upaya tersebut merupakan salah satu perwujudan tugas Penerbit BRIN untuk turut serta membangun sumber daya manusia unggul dan mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Buku ini selain mengulas tentang peran penting teknologi industri 4.0 dalam mengelola pasokan pangan yang tangguh, berkelanjutan, dan sehat, juga memperkenalkan beberapa teknologi digital dalam sistem rantai pasok pangan. Hal ini diperlukan agar penerapan teknologi industri 4.0 bisa dirasakan manfaatnya oleh masyarakat dan terintegrasi secara global.

Buku ini diharapkan dapat bermanfaat bagi para akademisi, termasuk pelajar, pengusaha, pemerintah, dan semua pemangku kepentingan terkait sektor pertanian agar tercipta rantai pasok pangan yang berkelanjutan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.



KATA PENGANTAR

Pertanian di Indonesia selalu berujung kepada nasib petani yang berada dalam kasta ekonomi rendah, yang selalu dipayungi oleh posisi tawar rendah lantaran mereka hanya sekadar petani berlahan sempit, petani penggarap bukan pemilik lahan. Nasib petani semakin tidak jelas karena peta jalan pembangunan pertanian yang tidak mengakar pada kompleksitas pertanian. Pendek kata, bicara petani adalah narasi ketidakberdayaan dan kemarginalan sosial.

Sementara itu, di sisi lain, pendidikan pertanian di Indonesia memang berkembang pesat, tetapi tidak “atas nama” nasib petani. Kurikulum pertanian hanya membicarakan kepentingan kehebatan konsepsi keilmuan dan jauh dari harapan petani atas berkembangnya ilmu pertanian di Indonesia. Kegiatan pertanian yang terdiri atas kegiatan *on-farm* dan *off-farm*, berada dalam kamar-kamar mewah keilmuan yang kadang kala dilupakan bahwa sejatinya mereka adalah saudara kandung. Impian untuk membangun jembatan produksi tanaman dan bisnis pertanian semakin jauh untuk bertemu pada satu titik bernama kesejahteraan petani.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Salah satu ruang gelap bagi petani produsen adalah rantai pasok. Rantai pasok pangan bagi petani adalah sebatas pinggir lahannya. Oleh karena itu, rantai pasok pangan menjadi sebuah jalur panjang yang tidak terlihat ujungnya sehingga petani produsen berada pada posisi keuntungan pada harga dasar. Terkadang produk mereka hanya bernilai “impas” karena tidak dikuasainya rantai pasok dan harga pasar. Bahkan di tengah pandemi Covid-19 ini, segala rantai pasok seakan makin panjang dan tidak terjangkau.

Komponen penting Revolusi Industri 4.0 adalah “*Internet of Things*” yang memudahkan manusia untuk berada dalam ruang digital. Kemajuan teknologi ini ternyata memiliki banyak peluang di banyak bidang, salah satunya pemasaran produk pertanian. Buku yang berjudul *Rantai Pasok Pangan Berkelanjutan dengan Penerapan Revolusi Industri 4.0* ini merupakan sebuah konsepsi nyata bagaimana peluang-peluang tersebut dapat dikembangkan. Rantai pasok pangan adalah kondisi *off-farm* yang kadang kala tidak dapat dijangkau oleh petani. Semakin panjang rantai pasok pangan, secara ekonomi, tidak menguntungkan petani. Oleh karena itu, pemanfaatan-pemanfaatan digital market berbasis *Internet of Things* dapat memperpendek rantai pasok produk. Selain itu, omzet dan layanan tidak terbatas kendala waktu dan tempat. Selamat membaca.

Prof. Dr. Ir. Gunawan Budiyanto, M.P., IPM



PRAKATA

Untuk masa depan pemenuhan pangan, kesejahteraan umat manusia, dan kelestarian lingkungan.

Pertanian kecil adalah lokomotif utama ekonomi di pedesaan dan memberi kontribusi besar untuk pembangunan wilayah. Meskipun pertanian kecil dianggap sebagai landasan kegiatan pertanian di berbagai negara, sektor ini paling sering menderita karena efisiensi dan efektivitas yang sangat rendah, sensitif terhadap cuaca, gangguan pasar, dan faktor eksternal lainnya, seperti hubungan dan komunikasi pemangku kepentingan rantai pasok pertanian yang buruk, terutama di tingkat pemrosesan pangan. Bahkan, dalam rantai pasok pangan, aktivitas utama yang datang dari budi daya pertanian pangan ke tahap pengolahan pangan, termasuk perdagangan, sangat berhubungan. Di seluruh rantai pasok pangan ini, dalam banyak kasus, pengetahuan pertanian yang ditransfer, dari generasi ke generasi, sangat penting dari sudut pandang budaya, tetapi di sebagian besar waktu, masih belum mampu menjawab kebutuhan rantai pasok pangan itu sendiri.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Sektor pertanian telah aktif dalam inovasi digital selama beberapa dekade. Kemajuan dalam pertanian presisi, pengindraan jauh, robot, sistem informasi manajemen pertanian, dan sistem pendukung keputusan telah membuka jalan bagi transformasi digital yang luas dalam pertanian dan pangan. Perkembangan terkini, yaitu teknologi industri 4.0, berpotensi mendorong perkembangan sistem yang cerdas dan saling terhubung. Teknologi tersebut akan memungkinkan pertanian berkembang di sistem terhubung yang digerakkan oleh data, cerdas, gesit, dan otonom. Operasi setiap proses pertanian akan secara otomatis terintegrasi dalam rantai pangan melalui teknologi semantik¹ hingga ke konsumen akhir. Revolusi industri keempat, kini merambah pertanian.

Berangkat dari potensi teknologi dan kebutuhan rantai pasok pangan, buku ini berusaha mengeksplorasi manfaat teknologi industri 4.0 dalam membangun masa depan rantai pasok pangan yang berkelanjutan. Platform teknologi yang ada memungkinkan akses ke beragam pemangku kepentingan dan menyediakan kemampuan penyebaran solusi teknologi informasi. Solusi ini diekspos oleh penyedia layanan atau dikembangkan oleh ahli perangkat lunak. Pengelolaan dan eksploitasi data pertanian adalah titik sentral antara kemampuan transformasi digital dan masalah rantai pasok pangan. Beberapa pembahasan utama menyangkut konsolidasi penyimpanan data dengan data terbuka, data tata kelola (kebijakan, peraturan daerah, dll.), dan data spesifik domain dari pengguna akhir. Tipologi data juga sangat kaya (lahan, lokasi, energi, iklim, dll.) dan volume data terus meningkat dengan integrasi sensor dan platform IoT di bidang pertanian. Semua teknologi tersebut memberikan kemampuan rekayasa untuk data pertanian. Penerapan teknik ini akan mampu menangani data petani, mengintegrasikan repositori data baru dari penyedia eksternal, mengubah data menjadi pengetahuan, dan mendukung sistem pendukung keputusan. Pemberdayaan transparansi data dengan kebijakan

¹ Teknologi semantik adalah seperangkat metode dan alat yang menyediakan sarana canggih untuk mengategorikan dan memproses data serta untuk menemukan hubungan dalam kumpulan data yang bervariasi.

berbagi data yang diperlukan akan mempercepat proses penyerapan dan pengeluaran data.

“Pertanian 4.0” muncul untuk memberikan teknologi canggih kepada petani dalam memenuhi tantangan produksi pertanian pangan sehingga dapat mencapai harga yang lebih terjangkau untuk pasar terbuka dan biaya minimum bagi petani. Dengan demikian, harapan untuk tahun-tahun mendatang adalah bahwa sektor pertanian dapat membantu memenuhi tantangan berkelanjutan dengan meningkatkan pendapatan pemangku kepentingan rantai pasok pertanian, mengurangi tekanan dalam menangani faktor kompleks dan eksternal yang tidak dapat mereka kendalikan, seperti cuaca, perilaku, dan kebijakan pasar, serta untuk bereaksi tepat waktu dengan memvisualisasikan tren kebutuhan saat ini.

Sistem pertanian pangan telah mengalami modernisasi dan mekanisasi yang signifikan, sebuah proses yang didukung oleh kebangkitan dan kekuatan monopoli dari pengolah pangan dan pengecer skala besar yang berusaha mengendalikan sebagian besar rantai pasok pangan yang memanjang dan mengglobal. Konsekuensi utama dari perkembangan tersebut adalah meningkatnya pemutusan antara pertanian dan pangan pada petani, produsen bahan pangan tradisional, dan konsumen akhir.

Sebagai respons pada dekade terakhir ini, kita bisa menyaksikan pengawasan kritis yang belum pernah terjadi sebelumnya seputar sifat dan pengembangan sistem penyediaan pangan kontemporer yang meningkatkan kekhawatiran masyarakat atas dimensi lingkungan dan keamanan pangan/kesehatan dari praktik pertanian industri. Kekhawatiran seperti itu mungkin mencapai puncaknya selama wabah penyakit tangan kaki mulut (PTKM) tahun 2001 di Inggris. Mereka timbul karena serangkaian ketakutan pangan sebelumnya yang merentang kembali ke *Salmonella* dalam telur pada tahun 1980-

an dan kaitannya dengan BSE², serta varian penyakit manusia, yaitu CJD³ pada tahun 1990-an.

Tiga perkembangan penting dan baru-baru ini muncul dari ketidaknyamanan itu, di antaranya adalah (1) beralih ke metode pertanian berkelanjutan; (2) menciptakan rantai pasok pangan 'lokal' dan 'lebih pendek'; dan (3) membentuk konsumerisme baru yang cerdas dan refleksif. Hal pertama dari pengembangan ini difokuskan pada pertanian (produksi) dan praktik penggunaan lahan yang berkelanjutan. Penekanannya adalah pada perubahan proses pertanian; usaha ini dapat terjadi dengan cara yang berbeda, termasuk modifikasi radikal sistem produksi untuk mencapai keberlanjutan (misalnya pertanian organik) atau modifikasi sistem yang ada untuk mengurangi dampak lingkungannya (misalnya pertanian terpadu). Upaya ini juga dapat melibatkan penggunaan praktik manajemen pertanian yang memelihara, meningkatkan, atau menciptakan kembali fitur lingkungan di pertanian (misalnya pagar tanaman, hutan, dinding, dan kolam). Sampai saat ini, banyak perdebatan tentang pertanian berkelanjutan yang berpusat pada pertanian, petani, dan dampak lingkungan dari praktik penggunaan lahan yang berbeda.

Sebaliknya, dua perkembangan lainnya, yaitu rantai pasok pangan yang lebih pendek dan konsumerisme refleksif, bersifat lebih baru dan fokus pada produk pangan lokal, biasanya dibangun berdasarkan kualitas, wilayah, dan keterikatan sosial. Dalam konteks ini, keberlanjutan terlihat dalam hal sistem pertanian pangan yang lebih luas, terutama hubungan vertikal dalam rantai pasok pangan. Penekanan pada rantai pangan yang berkelanjutan adalah titik awal yang penting karena rantai pangan secara keseluruhan adalah kerangka utama untuk pengawasan keberlanjutan.

² Bovine Spongiform Encephalopathy (BSE), umumnya dikenal sebagai penyakit sapi gila, adalah penyakit neurodegeneratif sapi yang tidak dapat disembuhkan dan selalu berakibat fatal.

³ Penyakit Creutzfeldt-Jakob (KROITS-felt YAH-kobe) (CJD) adalah gangguan otak degeneratif yang menyebabkan demensia dan pada akhirnya, kematian. Gejala penyakit Creutzfeldt-Jakob bisa mirip dengan gangguan demensia lainnya, seperti penyakit Alzheimer.

Ketertarikan pada pangan lokal dan rantai pangan berkelanjutan biasanya diakui sebagai respons terhadap ketidakstabilan pertanian pangan dan ditandai dengan pertumbuhan pembelian pangan dari gerai, seperti pasar petani, skema kotak, toko pertanian, pengiriman ke rumah, dan pertanian yang didukung masyarakat. Konsumen juga penting di sini karena perhatian konsumen setelah beralih dari harga, kemasan, dan penampilan, akan ke arah memperoleh produk pangan yang dapat ditelusuri orang dan di tempat tertentu.

Pertumbuhan di sektor pangan ‘lokal’ (dan pembangunan pedesaan berkelanjutan secara lebih umum) juga telah didorong oleh pengenalan Peraturan Pembangunan Pedesaan di Uni Eropa. Di bawah ‘pilar kedua’ Kebijakan Pertanian Bersama (*Common Agricultural Policy*) bertujuan untuk memperluas fokus kebijakan pedesaan pada pertanian menuju pendekatan yang lebih terintegrasi dan teritorial. Sementara itu, tujuan ekonomi masih sangat penting, dimensi sosial, budaya, dan lingkungan dari pembangunan pedesaan juga dipromosikan dan dilihat sebagai langkah yang signifikan untuk mendorong diversifikasi ekonomi, skema lingkungan pertanian, pengolahan lokal, dan pemasaran produk pertanian. Perkembangan kolektif ini menandakan munculnya ‘paradigma ekologi’ baru untuk pembangunan pedesaan dan meninggalkan modernisasi pertanian untuk menciptakan ruang pedesaan yang lebih multifungsi.

Dampak dari wabah PTKM di tahun 2001 juga menunjukkan perkembangan rantai pangan dengan baik. Peristiwa itu menggambarkan industri pangan dan pertanian Inggris yang ‘tidak berkelanjutan’ dan ‘terlepas dari ekonomi pedesaan dan lingkungan’, kemudian menekankan perlunya menghubungkan kembali pertanian dan industri pangan; menghubungkan pertanian dengan pasarnya dan rantai pangan; menghubungkan rantai pangan dengan pedesaan; dan untuk menghubungkan kembali apa yang konsumen makan, serta bagaimana pangan itu diproduksi.

Oleh karena itu, tantangannya adalah untuk mempertahankan struktur jaringan yang kompleks secara efisien, terhubung, dan terorganisasi dalam penggunaan teknologi industri 4.0, terutama untuk

mengidentifikasi dan memenuhi persyaratan dinamis pemangku kepentingan rantai pasok. Dalam konteks ini, faktanya, semua mesin pertanian menggabungkan kontrol elektronik dan telah memasuki era digital, serta meningkatkan kinerjanya. Selain itu, elektronik, penggunaan sensor dan *drone*, mendukung pengumpulan data utama pada beberapa aspek pertanian, seperti cuaca, spesialisasi geografis, perilaku hewan dan tanaman, serta seluruh siklus hidup pertanian. Namun, penggunaan metode yang tepat untuk meningkatkan kinerja rantai pasok pertanian masih menjadi tantangan sehingga konsep Industri 4.0 yang telah berkembang perlu disesuaikan dengan pertanian 4.0 untuk menganalisis perilaku dan kinerja dalam domain khusus ini.

Dengan demikian, pertanyaan tentang bagaimana pertanian 4.0 mendukung proses pengambilan keputusan rantai pasok yang lebih baik, atau dapat membantu menghemat waktu petani untuk membuat keputusan yang efektif berdasarkan data yang objektif, tetap terbuka. Maka dari itu, dalam buku ini, tinjauan berbagai teknologi baru dan metode rantai pasok yang tersedia akan dibahas untuk memahami jalur masa depan rantai pasok pangan.

Buku ini dibagi menjadi tiga bagian. *Pertama*, pendahuluan, sebagai pembuka dan gambaran konsep buku, berisikan tentang upaya membangun pasokan pangan yang tangguh, berkelanjutan dan lebih sehat. Bagian *kedua*, masih dalam tataran konseptual, membahas pengenalan industri 4.0 dan keberlanjutan secara umum, dilanjutkan dengan potensi penerapan teknologi industri 4.0 dalam sistem rantai pasok. Bagian *ketiga*, secara lebih teknis dalam bab-bab selanjutnya, membahas teknologi-teknologi disrupsi dan berbagai potensi solusi yang mampu diberikan oleh *Internet of Things* (IoT), *blockchain*, *big data*, kecerdasan buatan, sistem pengemasan pintar, teknologi anti-pemalsuan, *drone*, robotika, dan printer pangan 3D dalam sistem rantai pasok, termasuk pengiriman dan produksi pangan dibahas secara rinci. Kolaborasi teknologi disrupsi digital, seperti IoT, *blockchain*, *big data*, dan kecerdasan buatan secara berurutan dibahas lebih awal.

Selanjutnya, beralih pada aspek distribusi pangan, kita akan mengenal *drone* serta teknologi robotika dan otomatisasi. Dalam aspek produksi dan keamanan pangan, kita akan membahas kemasan pintar, teknologi anti pemalsuan, dan printer pangan 3D. Meskipun teknologi dalam buku ini dibagi menjadi beberapa kategori, mengingat rantai pasok merupakan penanganan seluruh aliran produksi barang atau jasa—mulai dari bahan mentah hingga pengiriman produk akhir ke konsumen—maka pada dasarnya semua teknologi tersebut memiliki peran yang bermuara pada tujuan yang sama, yaitu mengoptimalkan manajemen rantai pasok pangan. Dengan demikian, karya ini berfokus pada aplikasi teknologi industri 4.0 dalam upaya mewujudkan bidang rantai pasok pangan yang berkelanjutan di masa depan.

Fokus pada aspek rantai pasok pangan dan penerapan teknologi ini juga diharapkan mampu memberikan kontribusi akademis dan membuka perspektif baru bagi para industrialis dan pemangku kebijakan di sektor pertanian pangan untuk segera mendamaikan aspek lingkungan, profit, dan sosial masyarakat dalam aktivitas industri serta pembuatan produk kebijakan mereka. Inilah salah satu tujuan penting ditulisnya karya ini, yaitu untuk masa depan pemenuhan pangan, kesejahteraan umat manusia, dan kelestarian lingkungan. Dengan demikian, buku ini diharapkan dapat bermanfaat bagi para akademisi, termasuk pelajar, pengusaha, pemerintah, dan semua pemangku kepentingan terkait sektor pertanian dan rantai pasok pangan.

Teman-teman dan rekan-rekan saya yang terkasih, yang berkontribusi pada perbaikan buku dengan menyarankan isi, perbaikan kesalahan ketik, sumber daya, serta semua jenis kata yang hilang dalam buku saya, bahkan kesalahan ejaan kecil, yang namanya tidak dapat saya sebutkan di sini, saya ingin mengucapkan terima kasih. Faktor pertama dan terpenting dalam lahirnya karya ini adalah adanya lingkungan kerja yang damai. Ayah saya, Kurniadi; dan Ibu, Lia Harliah, serta adik saya, Ghina Gwi Kurnia, terima kasih karena telah memberi saya kesempatan ini dengan penuh pengabdian.

Tidak diragukan lagi, yang sesungguhnya pantas menerima ucapan terima kasih adalah para penulis karya-karya dalam daftar pustaka. Tanpa karya-karya itu, buku ini tidak akan ada. Setiap saran dan kritik dari rekan-rekan dan pembaca yang saya hormati dapat membuat buku saya lebih bebas dari kesalahan dan lebih bermanfaat.

Erzurum (Aziziye), 19 Oktober 2021

Hilmy Prilliadi

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB 1

Pasokan Pangan yang Tangguh, Berkelanjutan, dan Sehat

A. Peran Penting Pasokan Pangan

Pada tahun 2020, *The Economist* (2020) melaporkan bahwa industri pangan menyumbang 10% dari PDB global, dengan rantai pasok global senilai USD 8 triliun yang mempekerjakan sekitar 1,5 miliar orang. Oleh karena itu, guncangan apa pun pada rantai pasok ini akan memiliki dampak ekonomi, sosial, dan kesehatan yang merusak. Selain itu, sistem ini harus menyediakan pangan yang cukup untuk generasi mendatang. Banyak tujuan keberlanjutan yang digariskan oleh PBB terkait dengan pasokan pangan, yaitu nol kelaparan; kesehatan dan kesejahteraan yang baik; air bersih; sanitasi yang baik; serta industri, inovasi, dan infrastruktur yang berkembang.

Tersedianya beraneka ragam pangan yang aman, terjangkau, dan bergizi merupakan ciri masyarakat yang sejahtera. Sebagian orang yang tinggal di negara maju menerima begitu saja bahwa mereka mampu berjalan ke supermarket atau restoran dan membeli jenis pangan yang diinginkan. Namun, untuk sebagian besar sejarah ma-

nusia, hal ini tidak terjadi dan tidak ada jaminan bahwa hal ini akan selalu terjadi di masa depan. Populasi global yang terus bertambah akan menambah tekanan pada pasokan pangan sehingga kita perlu memberi makan semua orang dengan pangan berkualitas tinggi sembari meminimalkan kerusakan lingkungan. Selain itu, karena pasokan pangan menjadi lebih terintegrasi secara global, penting untuk memastikan bahwa pasokan pangan tahan terhadap guncangan ekonomi, politik, dan alam, seperti gangguan yang baru-baru ini disorot, yaitu pandemi SARS-CoV-2 (Covid-19).

Gambar 1.1 menunjukkan tantangan paling penting yang dihadapi rantai pasok pangan modern dan bagaimana kemajuan terkini dalam teknologi modern digunakan untuk mengatasi masalah tersebut.

Tantangan	Solusi Teknologi
<ul style="list-style-type: none"> • Perubahan iklim • Polusi • Penggunaan lahan dan air • Kelaparan dan malnutrisi • Jarak tempuh bahan pangan • Penyakit kronis terkait diet • Hilangnya keanekaragaman hayati • Pandemi global • Gangguan ekonomi • Keamanan pangan • Limbah pangan 	<ul style="list-style-type: none"> • Perubahan kebijakan • Rekayasa genetik • Bioteknologi • Nanoteknologi • Arsitektur pangan • Robotika dan otomatisasi • <i>Big Data</i> dan pembelajaran mesin • Protein alternatif • Teknologi sensor • Kecerdasan buatan • Kimia hijau

Sumber: McClements dkk. (2021)

Gambar 1.1. Inovasi teknologi untuk mengatasi tantangan utama dalam menciptakan pasokan pangan berlimpah, tangguh, sehat, dan berkelanjutan.

Penerapan teknologi baru ini dapat berdampak besar pada efisiensi dan keberlanjutan pasokan pangan global, sebagaimana ditekankan dalam laporan baru-baru ini oleh World Economic Forum, yang temuan utamanya dirangkum dalam Tabel 1.1 (WEF, 2019). Namun, inovasi teknologi hanyalah salah satu komponen dari strategi yang lebih luas. Diperlukan pendekatan holistik yang melibatkan keterlibatan pemangku kepentingan di seluruh rantai pasok pangan, termasuk produsen, pengolah, distributor, konsumen, pendidik, peneliti, dan pemangku kebijakan. Secara khusus, kebijakan, infrastruktur, dan investasi pemerintah diperlukan untuk merangsang dan mendukung inovasi, mempromosikan adopsi teknologi baru, dan menginformasikan konsumen tentang potensi manfaat dan kekurangan teknologi sehingga mereka dapat membuat pilihan berdasarkan informasi yang memadai. Selain itu, investor dan donor dari perusahaan swasta, organisasi filantropi, dan pemerintah diperlukan untuk membawa teknologi ini membuahkan hasil yang maksimal.

Tabel 1.1 Potensi dampak ekonomi dalam mengadopsi teknologi baru pada industri pangan dan pertanian

Inovasi Teknologi	Potensi Dampak Ekonomi
Protein alternatif (berbasis tanaman, berbasis serangga, pertanian seluler)	<ul style="list-style-type: none"> • Mengurangi emisi GRK (setara dengan 950 juta ton CO₂) • Mengurangi pengambilan air tawar (400 miliar m³) • Membebaskan 400 juta hektar lahan
Teknologi sensor (keamanan, kualitas, ketertelusuran)	Mengurangi limbah pangan (20 juta ton)
Nutrisi yang dipersonalisasi	Mengurangi kelebihan berat badan dan obesitas (55 juta orang) dan penyakit kronis lainnya
Pengiriman dengan layanan seluler (program dan aplikasi online)	<ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan pendapatan petani (\$200 miliar) • Mengurangi emisi GRK (100 megaton CO₂) • Mengurangi pengambilan air tawar (100 miliar m³)

Inovasi Teknologi	Potensi Dampak Ekonomi
<i>Big Data</i> dan analitik (perangkat keras dan perangkat lunak)	<ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan pendapatan petani (\$70 miliar) • Meningkatkan produksi (150 juta ton)
Transparansi dan keterlacakan rantai pasok secara real time dengan IoT	Mengurangi limbah pangan (35 juta ton)
Teknologi berkemampuan <i>Blockchain</i>	Mengurangi limbah pangan (30 juta ton)
Pertanian presisi (menabur, menanam, memanen, dll.)	<ul style="list-style-type: none"> • Mengurangi biaya petani (\$100 miliar) • Meningkatkan produksi (300 juta ton) • Mengurangi pengambilan air tawar (180 miliar m³)
Rekayasa genetik (benih)	<ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan pendapatan petani (\$100 miliar) • Meningkatkan produksi (400 juta ton) • Mengurangi kekurangan zat gizi mikro (100 juta orang)
Teknologi mikrobioma (tanaman pertanian)	<ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan pendapatan petani (\$100 miliar) • Meningkatkan produksi (250 juta ton) • Mengurangi emisi GRK (setara 30 megaton CO₂)
Teknologi pengelolaan tanaman dan tanah yang canggih (biologis dan unsur hara mikro)	<ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan produksi (50 juta ton) • Mengurangi emisi GRK (setara 5 megaton CO₂)
Pembangkit dan penyimpanan energi terbarukan (matahari, angin, air, baterai)	<ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan pendapatan petani (\$100 miliar) • Meningkatkan produksi (530 juta ton) • Mengurangi pengambilan air tawar (250 miliar m³)

Sumber: WEF (2019)

B. Ketahanan dan Kerentanan Pangan: Pelajaran dari Pandemi Global

Pandemi Covid-19 telah menunjukkan ketahanan dan kerentanan pada pasokan pangan modern. Mayoritas dari mereka yang tinggal di negara maju telah mampu mengamankan sebagian besar bahan pangan mingguan mereka, meskipun dengan ketidaknyamanan yang jauh lebih besar karena aturan jarak sosial dan pembelian produk tertentu secara panik. Hal ini menyoroti ketahanan yang melekat pada sebagian besar rantai pasok pangan modern, yaitu sebagian besar pangan masih diproduksi dan didistribusikan. Selama pandemi, masih ada cukup pangan untuk memberi makan seluruh penduduk, meskipun ada kekurangan pada produk tertentu (Vilsack, 2020). Namun, pandemi telah menyoroti hubungan yang lemah dan potensi kerentanan dalam rantai pasok pangan.

Pandemi telah menutup banyak restoran, kafe, bar, dan pusat distribusi pangan lainnya. Hal ini menyebabkan mereka dengan cepat berputar dari penjualan di tempat ke perdagangan elektronik, ditambah dengan pengiriman tanpa kontak atau penjemputan di tepi jalan. Beberapa fasilitas produksi pangan, khususnya pabrik pengolahan daging, terpaksa ditutup karena tingginya tingkat infeksi yang disebabkan oleh jarak pekerja yang dekat dan kondisi kerja yang berat. Misalnya, lebih dari 1.000 kasus Covid-19 dilaporkan dari satu rumah jagal di barat laut Jerman pada musim panas 2020 (DeutscheWelle, 2020). Gangguan ini telah mengakibatkan peningkatan limbah pangan dan kerugian ekonomi. Dalam wawancara dengan *BBC*, Andre Laperriere, Direktur Eksekutif Global Open Data for Agriculture and Nutrition (GODAN) melaporkan bahwa limbah pangan di negara maju telah meningkat dari sekitar 30% menjadi 40% karena pandemi. Sebagai contoh, banyak hewan di industri peternakan tidak dapat diolah menjadi daging karena penutupan fasilitas pemrosesan sehingga para peternak terpaksa menidurkan mereka. Di masa depan, penting untuk memiliki lebih banyak fasilitas pemrosesan daging otomatis yang lebih kecil daripada beberapa fasilitas padat karya besar yang meningkatkan risiko gangguan.

Demikian pula, banyak petani dibiarkan memiliki banyak hasil panen yang tidak terjual (buah-buahan dan sayuran) ketika rantai pasok rusak, restoran dan fasilitas lainnya (sekolah, universitas, dan industri perhotelan) ditutup, yang menyebabkan kerugian ekonomi, peningkatan limbah (pembuangan susu, daging, dan produk segar) dan mengurangi keberlanjutan (Kawamura, 2020). Gangguan ini menyoroti perlunya perubahan kebijakan dan infrastruktur yang mendorong pengalihan pasokan pangan ketika ada gangguan dalam rantai pasok.

Pandemi ini juga telah membatasi transit lintas batas pekerja migran yang biasanya memanen buah dan sayuran, serta membatasi transportasi pangan antarprovinsi dan negara dengan kendaraan pengiriman. Hal itu menyebabkan penumpukan stok dan limbah pangan yang signifikan. Kondisi ini juga menghasilkan protokol sanitasi baru di setiap mata rantai produksi dan pengiriman pangan. Dampak lainnya adalah pengiriman makan siang yang bergizi ke sekolah menjadi paling rentan terhambat.

Pergeseran distribusi pangan dari restoran ke konsumsi rumah tangga telah menuntut perubahan dalam kemasan pangan, ukuran porsi, dan label produk. Investasi tahap awal pengusaha industri pangan telah berkurang dan pendapatan bagi banyak perusahaan pangan telah berkurang. Seorang analis riset di Credit Suisse memperkirakan bahwa pengeluaran pangan di rumah meningkat menjadi 80% dari total pengeluaran pangan selama pandemi, dibandingkan sebelum pandemi, yaitu 47% (Hensel & Kuhn, 2020). *The Economist* (2020) baru-baru ini melaporkan bahwa jumlah pangan yang didistribusikan oleh bank pangan di Amerika Serikat telah meningkat lebih dari 20% dan 1 dari 6 anak tidak cukup makan karena pandemi, terutama karena peningkatan pengangguran yang tinggi. Jika angka pengangguran yang tinggi ini bertahan untuk waktu yang lama, sifat pangan yang diproduksi oleh industri pangan dapat berubah. Secara khusus, mungkin ada penekanan yang lebih besar pada produksi pangan ringan yang lebih murah. Penting untuk memastikan pangan ini

bergizi serta enak dan terjangkau. Selain itu, sumber daya mungkin perlu diberikan kepada keluarga sehingga mereka mampu membeli pangan sehat untuk memberi makan diri sendiri dan keluarga mereka.

Secara umum, yang paling terkena dampak krisis ini adalah beberapa orang termiskin di Amerika Serikat dan negara-negara lain. PBB juga memperkirakan jumlah orang dengan kelaparan akut sebagai akibat dari pandemi di dunia akan bertambah hampir dua kali lipat sehingga menjadi sekitar 265 juta (The Economist, 2020). Sangat penting untuk mengatasi masalah ini dengan membuat rantai pasok pangan yang lebih tangguh dan responsif terhadap tekanan semacam ini.

SARS-CoV-2 meskipun dampaknya tak tertandingi pada rantai pangan, mengikuti jejak wabah penyakit menular lainnya, yaitu Flu Burung H5N1 (2004); influenza H1N1 (2009); MERS-CoV (2012); dan Ebola (2014, 2018). Dinamika penularan penyakit, ditambah dengan sifat sistem distribusi pangan global yang sangat saling terkait, menandakan bahwa sangat penting bagi industri pangan dalam mengembangkan strategi yang efektif untuk mencegah, mengurangi, dan mendeteksi dampak dari wabah menular di masa depan.

Selain itu, pandemi global yang memiliki fitur pengganggu uniknya sendiri (jarak sosial, pengurangan tenaga kerja, dan pengangguran), hanyalah salah satu potensi gangguan pada pasokan pangan kita. Penyebab lain yang ditemui, seperti pertumbuhan penduduk, pemanasan global, degradasi lingkungan, angin topan, letusan gunung berapi, badai matahari, serangan teroris, perang nuklir, krisis ekonomi, dan faktor politik, memiliki efek berbeda yang perlu dianalisis dan diperhitungkan dengan cermat ketika merancang rantai pasok pangan yang lebih kuat. Upaya ini akan membutuhkan tes stres yang serupa dengan yang digunakan oleh sistem perbankan.

Berbagai inovasi teknologi sedang dikembangkan untuk mengatasi masalah terkait ketahanan pasokan makanan modern terhadap pandemi dan gangguan lainnya. Beberapa yang paling penting, secara singkat akan disorot di sini.

1. Logistik melalui *E-commerce* dan *Delivery Order*

Layanan pangan di tempat yang sangat dibatasi karena ketakutan akan penularan virus dan kebutuhan menjaga jarak sosial, membuat pengiriman pangan dan penjemputan pangan di tepi jalan meroket, sering kali pemesanan dilakukan dengan pembayaran pada perangkat selular untuk menghilangkan kontak manusia. Semakin banyak orang yang merasa nyaman dengan pengalaman makan seperti ini, membuat mereka cenderung tidak pergi ke supermarket atau restoran. Hal ini tentu mengubah cara manusia membeli dan mengonsumsi pangan.

Meskipun pengiriman ke rumah yang dikoordinasikan melalui aplikasi *online* nyaman digunakan oleh konsumen dan membantu menjaga jarak sosial, mereka cenderung merusak lingkungan. Banyaknya bahan bakar fosil yang dikeluarkan untuk mengirimkan pangan ke rumah tangga individu dan banyaknya kemasan yang sering digunakan, menyebabkan peningkatan limbah di lingkungan. Selain itu, layanan pengiriman ke rumah sering kali lebih mahal sehingga hanya mereka yang mampu yang bisa membelinya. Beberapa masalah ini dapat diatasi dengan menggunakan kendaraan listrik otonom untuk mengirimkan pangan ke rumah atau dengan mengembangkan bahan kemasan yang dapat digunakan kembali atau terurai secara hayati.

Pendekatan *e-commerce* yang inovatif juga digunakan oleh petani untuk membantu mereka mengalihkan produk yang tidak dapat dijual karena terganggunya rantai distribusi. Misalnya, platform perdagangan *online* (iTradeNetwork) yang memfasilitasi manajemen rantai pasok produk yang mudah rusak. Platform ini telah digunakan untuk menghubungkan petani dengan perusahaan yang mencoba membeli atau menjual pangan selama pandemi (Shveda, 2020). Layanan digital ini meningkatkan kualitas, keberlanjutan, dan ketahanan pasokan pangan dengan menjaga kesegaran, mengurangi limbah, dan meningkatkan keserbagunaan. Ketika petani dan produsen pangan menjadi lebih akrab dengan teknologi ini dan didorong oleh kebutuhan untuk mengatasi gangguan yang disebabkan oleh pandemi, lebih mungkin

bagi mereka untuk mengadopsinya sehingga menguntungkan pasokan pangan di masa depan.

Beberapa perusahaan telah mengembangkan platform digital baru bagi perusahaan pangan untuk secara khusus mengatasi jarak sosial dan pelacakan kontak di dalam fasilitas mereka sebagai akibat dari pandemi. Misalnya, Proximity Trace TM from Triax (Norwalk, CT) adalah perangkat lunak yang dikembangkan untuk menyertakan sensor peringatan jarak saat pekerja terlalu berdekatan, serta mencatat interaksi antarpekerja untuk memfasilitasi pelacakan kontak, jika pekerja tertular virus.

2. Robotika dan Otomatisasi

Banyak aktor dalam rantai pasok pangan, termasuk pemasok bahan mentah, produsen pangan, dan distributor pangan, telah mengembangkan cara inovatif untuk memenuhi tantangan logistik yang terkait dengan pandemi global, yang banyak di antaranya tidak terbayangkan, bahkan satu dekade lalu. Pembatasan transportasi menghambat ketersediaan tenaga kerja migran sehingga keterlibatan robotika dan alat pemanen semakin banyak digunakan oleh para petani. Selain itu, lebih banyak digunakan pula fasilitas produksi pangan yang mempekerjakan robot untuk melakukan tugas-tugas yang biasanya dilakukan oleh manusia, seperti menyortir, menyiapkan, memproses, dan mengemas pangan. Di banyak kota yang menerapkan *lockdown*, kendaraan pengiriman pangan bagaikan robot yang digunakan untuk menghindari pertemuan tatap muka. Selain itu, supermarket juga menghilangkan kebutuhan akan kasir saat *checkout*—seseorang sudah dapat berjalan ke beberapa toko (seperti toko Amazon Go di Seattle), memilih dan membeli bahan pangan, dan pergi tanpa harus berinteraksi dengan orang lain.

Tren ini kemungkinan akan berlanjut setelah *lockdown* dan mungkin berdampak besar pada cara kita memproduksi, memproses, dan mendistribusikan pangan di masa depan. Banyak dari inovasi ini akan membuat sistem pangan lebih efisien, meningkatkan kualitas pangan dan mengurangi limbah, tetapi juga akan berdampak negatif.

Banyak pekerja dalam rantai pasok pangan akan kehilangan pekerjaan dan memerlukan kebijakan yang inovatif.

3. Pertanian *Indoor*: Pertanian Vertikal

Potensi gangguan transportasi di sepanjang rantai pasok pangan telah mendorong pengembangan fasilitas produksi pangan yang dekat dengan lokasi perkotaan, termasuk pertanian dalam ruangan yang dikendalikan oleh iklim berteknologi tinggi seperti pertanian vertikal (Gambar 1.2). Perusahaan mencari ruang untuk menempatkan pertanian ini di kota-kota, seperti tempat parkir yang tidak digunakan, atap gedung, gudang yang tidak terpakai, terowongan bawah tanah, bahkan kontainer pengiriman, serta membangun fasilitas yang dibangun khusus. Pertanian dalam ruangan ini dirancang untuk secara hati-hati mengontrol tingkat cahaya, kelembapan, nutrisi, dan suhu guna mengoptimalkan tingkat nutrisi, pertumbuhan, dan kesehatan tanaman. Awalnya, hanya tanaman buah dan sayuran bernilai tinggi, seperti rempah-rempah, salad hijau, dan kecambah, yang secara komersial layak menggunakan pendekatan ini, tetapi kemajuan teknologi mengarahkan kelangsungan hidup untuk peningkatan jumlah tanaman lainnya. Inovasi ini akan memperpendek rantai pasok dan membuatnya lebih tahan terhadap gangguan di masa depan. Operasi pertanian dalam ruangan memiliki banyak fitur yang membuatnya tahan terhadap pandemi. Pertanian vertikal biasanya memiliki standar sanitasi yang lebih tinggi daripada pertanian konvensional dan terus menguji pasokan air dan input lain untuk kontaminan potensial. Pertanian vertikal melibatkan otomatisasi tingkat tinggi dan menggunakan sensor untuk memantau pertumbuhan dan kualitas tanaman sehingga meminimalkan kontaminasi silang dan ancaman penularan virus.

Gambar 1.2 adalah contoh pertanian vertikal yang dibangun oleh Aerofarms sekaligus penelitian dan pengembangan operasi pertanian vertikal dalam ruangan terbesar di dunia dan telah menanam lebih dari 800 jenis tanaman yang berbeda. Perusahaan ini dapat dengan cepat mengubah jadwal produksi ketika operasi perusahaan pangan



Sumber: Redman (2021)

Gambar 1.2 Penerapan Pertanian Vertikal

dan layanan pangan berhenti pada awal pandemi karena siklus pertumbuhan yang cepat dan sifat produksi tanaman dalam ruangan yang terukur. Menurut salah satu pendiri, Marc Oshima, ketika pesanan bergeser dari makan di tempat menjadi pesan antar/bawa pulang, pertanian vertikal perusahaan dapat dengan cepat memenuhi pasar baru dan memasok produk yang aman, segar, dan beragam sesuai permintaan.

4. Strategi Pola Makan untuk Melindungi Kekebalan Tubuh

Orang yang sakit parah atau meninggal karena Covid-19 umumnya memiliki sistem kekebalan tubuh yang lemah (Tay dkk., 2020). Penelitian menunjukkan bahwa kemampuan sistem kekebalan tubuh manusia untuk mengatasi infeksi dapat ditingkatkan melalui intervensi diet. Akibatnya, para peneliti mencoba membangun hubungan antara diet, pangan, dan/atau komponen pangan tertentu dengan sistem kekebalan manusia. Pengetahuan yang diperoleh dari upaya ini dapat mengarah pada generasi baru produk pangan fungsional yang dirancang khusus untuk meningkatkan kesehatan dan ketahanan ma-

nusia dengan memperkuat sistem kekebalan tubuh. Apalagi, penderita diabetes, obesitas, dan hipertensi yang juga dapat diatasi melalui pola makan, berisiko lebih tinggi meninggal akibat Covid-19. Mengurangi asupan kalori secara keseluruhan dan makan lebih banyak buah dan sayur, ditambah dengan olahraga ringan, dapat secara signifikan meningkatkan fungsi kekebalan tubuh. Buktinya, diet sehat yang digabungkan dengan olahraga teratur menjadi sebuah strategi mitigasi utama yang lebih efektif daripada pendekatan terapeutik atau farmasi.

5. Kemasan dan Tampilan Pangan yang Inovatif

Pangan dan bahan kemasan merupakan sumber potensial penyebaran mikroorganisme patogen, termasuk virus Covid-19. Beberapa virus, serta mikroorganisme patogen lainnya, dapat bertahan selama berjam-jam atau berhari-hari pada permukaan pangan dan kemasan tertentu dan lebih lama di bawah kondisi pendinginan dan penyimpanan beku. Hal ini meningkatkan masalah keamanan bagi konsumen serta personel layanan dan pemrosesan pangan di sepanjang rantai pasok pangan.

Kemampuan virus atau bakteri apa pun untuk bertahan hidup di permukaan memiliki konsekuensi bagi industri pangan. Secara khusus, ini telah memengaruhi cara produk segar ditampilkan, dikemas, dan diproses. Di masa depan, mungkin ada lebih sedikit pangan nonkemasan yang dapat dipilih langsung oleh konsumen, seperti buah-buahan segar, sayuran, roti, dan produk panggang lainnya. Kekhawatiran ini dapat menyebabkan perubahan ke pangan yang dibungkus lebih personal sehingga merugikan lingkungan karena meningkatnya jumlah bahan kemasan yang dibutuhkan.

Oleh karena itu, perlu dikembangkan bahan kemasan pangan berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk menggantikan plastik. Banyak peneliti pangan sudah bekerja di bidang ini dan berbagai bahan kemasan inovatif telah dibuat dari sumber berkelanjutan, seperti protein dan polisakarida yang ditemukan di aliran limbah. Misalnya, bahan kemasan aktif sedang dikembangkan, tidak hanya memberikan perlindungan fisik pada pangan dengan membentuk

penghalang mekanis, mengendalikan aliran gas, dan menyaringnya dari radiasi ultraviolet yang berbahaya, tetapi juga mengandung antimikrob alami yang melindungi pangan dari pembusukan atau mikrob patogen. Selain itu, bahan kemasan cerdas yang sedang dikembangkan, memiliki sensor terintegrasi yang memberikan informasi terperinci tentang kesegaran atau keamanan pangan.

6. Sumber Protein Alternatif

Covid-19 dan berbagai penyakit menular lainnya muncul karena transfer virus dari hewan ke manusia. Memang, dihipotesiskan bahwa pandemi ini dimulai karena penularan virus dari kelelawar ke hewan ternak eksotis (mungkin trenggiling) dan kemudian ke manusia. Kontak erat antara hewan dan manusia dalam industri peternakan dapat meningkatkan penyebaran virus, seperti yang ditunjukkan oleh berbagai penyakit menular yang menyerang manusia dalam beberapa dekade terakhir, termasuk flu babi (babi), flu burung (ayam), dan penyakit sapi gila (sapi).

Peningkatan kesadaran masyarakat akan risiko penyebaran penyakit zoonosis terkait dengan produksi ternak, dapat meningkatkan minat untuk mengganti protein hewani dengan alternatif non-hewani, seperti yang berasal dari tumbuhan, serangga, rumput laut, atau pertanian seluler. Banyak peneliti telah bekerja untuk mengidentifikasi, mengisolasi, dan memurnikan protein ini dari sumber alami, serta menggunakannya untuk membuat produk pangan yang berhasil menggantikan pangan berbasis hewani konvensional, seperti susu, keju, telur, dan daging. Produk komersial yang telah sukses dibuat, terutama dari *Impossible Foods*, *Beyond Meat*, dan *Just*. Namun, masih diperlukan lebih banyak dana dari lembaga pemerintah dan investor swasta untuk merangsang penelitian di bidang penting ini.

C. Produksi Pangan dan Keberlanjutan

PBB memperkirakan populasi global akan mencapai hampir 10 miliar pada tahun 2050 (PBB, 2019). Banyak orang akan meningkatkan konsumsi protein hewani mereka melalui pangan berprotein tinggi,

seperti daging, ikan, telur, dan susu ketika mereka menjadi lebih kaya. Pemeliharaan dan pengolahan hewan untuk pangan membutuhkan sumber daya yang lebih berharga (tanah dan air) dan menyebabkan lebih banyak kerusakan lingkungan (emisi gas rumah kaca, polusi, dan kepunahan spesies) daripada pangan nabati dalam jumlah yang sama (Willett dkk., 2019). Tantangan utama yang dihadapi rantai pasok pangan modern adalah memberi makan populasi dunia yang berkembang, sembari melindungi lingkungan.

Banyak teknologi inovatif sedang dikembangkan untuk mengatasi masalah terkait pemroduksian lebih banyak pangan, pengurangan limbah pangan, dan pengurangan dampak negatif dari produksi pangan terhadap lingkungan. Inovasi ini mencakup pengoptimalan benih menggunakan pendekatan genetik, meningkatkan pertumbuhannya menggunakan pestisida dan pupuk generasi masa depan, memanen, memproses, dan mengangkutnya menggunakan mesin otonom. Beberapa contohnya adalah sebagai berikut.

1. Meningkatkan Produksi Pangan melalui Bioteknologi Modern

Bioteknologi modern sedang diterapkan pada praktik pertanian untuk meningkatkan efisiensinya dan menciptakan produk baru dengan lebih baik. Secara khusus, rekayasa genetik telah memiliki dampak besar pada pangan yang diproduksi secara global dan dapat dikatakan memiliki potensi besar untuk terus mengubah pasokan pangan. Gen dari banyak hewan, tumbuhan, dan mikroba yang digunakan dalam produksi pangan dapat dimanipulasi secara tepat untuk meningkatkan hasil pangan, ketahanan, keberlanjutan, dan nutrisi. Namun, penting juga untuk dicatat bahwa teknologi rekayasa genetika ini aman, tidak menyebabkan kerusakan lingkungan yang tidak semestinya, dan dapat diterima oleh konsumen dan pemerintah. Masih ada resistensi yang cukup besar terhadap pangan yang dimodifikasi secara genetik/*genetically modified* (GM), meskipun ada bukti kuat bahwa mereka telah berhasil digunakan selama beberapa dekade tanpa menyebabkan masalah kesehatan manusia atau lingkungan.

Ada banyak aplikasi potensial rekayasa genetika di bidang pangan dan pertanian yang telah meluas dengan munculnya teknologi pengeditan genom berbasis CRISPR. Sebagai contoh, rekayasa genetika dapat digunakan untuk meningkatkan profil nutrisi lipid pada tanaman komoditas, seperti kedelai atau kanola, dengan meningkatkan jumlah asam lemak tak jenuh ganda (ω -3) yang dikandungnya (Zafar dkk., 2019). Ini juga dapat digunakan untuk mengurangi sisa pangan dengan menghambat pencokelatan buah dan sayuran, seperti apel dan kentang. Usaha ini dapat dicapai dengan mengedit gen mereka untuk mengurangi konsentrasi enzim spesifik yang diekspresikan oleh tanaman, seperti polifenol oksidase. Memang, produk komersial sudah ada di pasar Amerika Serikat yang menggunakan pendekatan ini untuk meningkatkan kualitas pangan dan mengurangi limbah pangan, misalnya pencokelatan apel dikurangi oleh Arctic Apples™ dan kentang oleh Simplot™. Pengeditan genom juga diterapkan untuk meningkatkan kualitas ternak (sapi tanpa tanduk, babi yang lebih ramping, dan hewan yang lebih tahan penyakit) serta mikroba yang digunakan dalam fermentasi pangan (kultur starter susu, ragi bir, dan probiotik) (Doudna & Sternberg, 2017).

2. Meningkatkan Ketahanan Pangan Menggunakan Pertanian Seluler

Pertanian seluler adalah bioteknologi inovatif yang berpotensi mengurangi dampak lingkungan dari sistem produksi pangan modern (Waschulin & Specht, 2018). Daging yang dibudidayakan atau bersih dapat ditanam dalam bioreaktor skala komersial dengan membudidayakan sel yang diisolasi dari hewan hidup dalam lingkungan yang sesuai. Biasanya, beberapa sel dikumpulkan dan ditumbuhkan dalam bioreaktor yang berisi larutan nutrisi dan faktor pertumbuhan. Suhu, kadar oksigen, dan gaya mekanik di dalam bioreaktor juga dioptimalkan untuk merangsang pertumbuhan sel yang efisien.

Daging budi daya memiliki beberapa manfaat potensial dibandingkan daging konvensional karena alasan lingkungan, keberlanjutan, dan etika. Hal ini menghasilkan lebih sedikit emisi gas rumah

kaca, menghasilkan lebih sedikit polutan, dan membutuhkan lebih sedikit lahan dan air daripada daging konvensional. Upaya ini tidak menyebabkan hilangnya keanekaragaman hayati yang terkait dengan produksi ternak modern, serta tidak melibatkan pengurangan dan penyembelihan hewan dalam jumlah besar, seperti sapi, babi, domba, dan ayam. Selain itu, tidak memerlukan kontak dekat antara hewan dan manusia sehingga mengurangi risiko penyakit zoonosis, seperti Covid-19. Tantangan utama di bidang ini adalah menghasilkan produk, seperti daging secara ekonomis dalam skala yang dapat berdampak besar pada pasar ternak konvensional. Namun, banyak perusahaan telah mengklaim bahwa mereka akan membawa produk daging budi daya ke pasar dalam waktu dekat, seperti Just dan Memphis Meats dari California.

Pertanian seluler juga digunakan dalam industri pangan untuk membuat bahan pangan fungsional, seperti enzim, pengemulsi, vitamin, *nutraceuticals*, warna, dan rasa, yang disekresikan oleh ragi atau bakteri tertentu selama fermentasi mikrob. Beberapa perusahaan pangan telah mengembangkan proses pertanian seluler berdasarkan mikrob spesifik untuk menghasilkan protein yang analog dengan protein yang ditemukan dalam daging, telur, atau susu, misalnya, Perfect Day menghasilkan protein susu, Clara Foods menghasilkan protein telur, dan Modern Meadow menghasilkan protein daging. Gen yang diketahui mengkode protein tertentu (seperti protein susu) dimasukkan ke dalam materi genetik mikrob (Darvishi dkk., 2018). Mikrob kemudian ditumbuhkan ke tangki fermentasi dalam kondisi optimal, yang mendorongnya untuk mengekspresikan protein yang diinginkan, diisolasi dan dimurnikan. Proses pertanian seluler ini sangat kuat karena dapat digunakan untuk membuat protein apa pun yang ditemukan di alam, asal urutan DNA yang diperlukan untuk mengekspresikannya, dapat diketahui. Namun, dalam banyak kasus, pekerjaan besar perlu dilakukan untuk menciptakan operasi pemrosesan yang layak secara ekonomi dan dapat menghasilkan bahan pangan dalam skala yang layak secara komersial. Selain itu, sangat

penting untuk mengatasi persepsi konsumen yang tidak menguntungkan tentang pangan yang dimodifikasi secara genetik, sebelum teknologi itu dapat diterima sepenuhnya.

Mikrob padat nutrisi, seperti alga, jamur, dan bakteri, yang sesuai untuk konsumsi manusia, juga dapat dibudidayakan di dalam bioreaktor menggunakan metode fermentasi modern. Penerapan pendekatan ini (Quorn™) yang sukses secara komersial, melibatkan produksi produk, seperti filet daging, burger, nugget, dan sosis, menggunakan jamur mikro yang dikenal sebagai *Fusarium venenatum*. Mikrob ini tumbuh menjadi filamen tipis yang agak menyerupai serat otot pada produk daging konvensional dalam hal penampilan, tekstur, dan rasa di mulut. Mikrob jenis lain juga berpotensi sebagai pengganti daging dan sedang diselidiki untuk tujuan ini.

3. Mengurangi Limbah Pangan melalui Bioteknologi

Saat ini, sebanyak 30–40% dari pangan yang diproduksi secara global, terbuang sia-sia sehingga menyebabkan hilangnya nutrisi dan sumber daya yang berharga. Pendekatan bioteknologi inovatif sedang dikembangkan untuk mengurangi limbah dan meningkatkan nilai ekonomi dengan meningkatkan proses sampingan pangan. Valorisasi aliran sampingan dari banyak proses pangan skala besar klasik, seperti pembuatan bir, produksi keju, dan pemrosesan daging telah menjadi vital untuk meningkatkan daya saing dan keberlanjutan. Proses *biorefinery* ini digunakan untuk membuat bahan pangan fungsional baru dari berbagai aliran sampingan dengan melakukan transformasi mikrob atau enzimatik yang terkontrol. Beberapa dari aliran samping ini juga digunakan sebagai sumber daya untuk menciptakan bahan kemasan pangan *biodegradable* yang inovatif untuk mengurangi dampak negatif plastik terhadap lingkungan. Secara keseluruhan, teknologi ini berpotensi menciptakan lapangan kerja baru, mengurangi limbah, mengurangi polusi, dan menyediakan pangan yang lebih sehat dan berkelanjutan.

4. Meningkatkan Efisiensi Pertanian Menggunakan Nanoteknologi

Nanoteknologi melibatkan penciptaan atau manipulasi bahan pada skala nano (1–100 nm) untuk memperkenalkan sifat fisikokimia baru (Khot dkk., 2012). Atribut fungsional bahan sering berubah jauh ketika dimensi mereka direduksi menjadi skala nano yang mengarah ke pendekatan inovatif untuk meningkatkan proses produksi pangan. Nanoteknologi juga bisa digunakan untuk mengembangkan pupuk dan pestisida nano yang memiliki keunggulan dibandingkan pupuk atau pestisida konvensional. Nanoteknologi dapat menyediakan perangkat dan mekanisme untuk menyinkronkan pelepasan nitrogen (dari pupuk) dengan penyerapannya oleh tanaman; pupuk nano harus melepaskan nutrisi sesuai permintaan sambil mencegahnya berubah sebelum waktunya menjadi bentuk kimia/gas yang tidak dapat diserap oleh tanaman. Misalnya, dimensi kecil dari nanopartikel memungkinkan mereka untuk menembus ke dalam tanaman, lebih mudah daripada partikel yang lebih besar. Akibatnya, mereka dapat menunjukkan fungsi yang diinginkan secara lebih efektif, misalnya, dengan menyediakan nutrisi bagi tanaman atau dengan menghancurkan patogen tanaman yang terinternalisasi. Pestisida dan pupuk nano-enabled generasi baru akan meningkatkan hasil panen, mengurangi limbah, meningkatkan kualitas, dan mengurangi polusi.

Nanopartikel yang difungsikan, juga digunakan sebagai alat diagnostik yang sangat kecil untuk menghasilkan data tentang tahap pertumbuhan atau status kesehatan tanaman, kualitas tanah di sekitarnya, atau kondisi lingkungan tempat tanaman terpapar (Kamle dkk., 2020). Filter air yang mengandung serat nano telah dikembangkan untuk menghilangkan kontaminan atau nutrisi dari aliran limbah yang timbul dari produksi pertanian sehingga dapat mengurangi polusi dan menciptakan sumber daya baru. Nanopartikel juga telah digunakan untuk desalinasi air laut sehingga meningkatkan jumlah air yang tersedia untuk aplikasi pertanian. Kaphle dkk. (2018) menyajikan aplikasi nanomaterial ini di bidang pertanian, pangan,

dan lingkungan untuk perlindungan tanaman; pengobatan penyakit; bahan kemasan; pengembangan rasa, tekstur, dan sensasi baru; deteksi patogen; dan sistem pengiriman. Mereka membahas penilaian risiko bahan nano dan dampak toksikologi bahan nano pada pertanian, makanan, dan lingkungan. Mereka kemudian memberikan pedoman peraturan untuk penggunaan bahan nano yang lebih aman.

5. *Big Data*, Kecerdasan Buatan, dan Pembelajaran Mesin

Kemampuan kita untuk memproduksi dan mendistribusikan pangan secara efisien dapat dioptimalkan dengan menghasilkan informasi yang lebih rinci dan komprehensif tentang sifat-sifatnya di sepanjang rantai pangan dan bertindak cepat berdasarkan pengetahuan ini. Teknologi sensor inovatif pun sedang dibuat untuk mendapatkan data tentang atribut pangan tertentu (seperti komposisi, kualitas, kesegaran, dan kontaminasi mikrob) dan faktor-faktor yang memengaruhinya (seperti suhu, kelembapan, cahaya, dan kadar oksigen). Sebagai contoh, tahap pertumbuhan dan status kesehatan tanaman pertanian dan tanah yang menyuburkannya dapat dipantau dengan menggunakan sensor kecil yang ditanam di dalam atau di dekat tanaman sehingga air, pupuk, dan pestisida dapat diterapkan pada waktu yang tepat serta memungkinkan panen pada waktu yang optimal. Jenis pertanian presisi ini dapat memperlakukan setiap tanaman secara individual sesuai dengan kebutuhan spesifiknya sehingga meningkatkan hasil dan mengurangi limbah.

Sensor sudah tersedia dan akan menghasilkan data tentang kondisi lingkungan yang dihadapi tanaman pertanian atau produk pangan saat dipanen, disimpan, diproses, dan didistribusikan, termasuk faktor-faktor, seperti variasi suhu, paparan cahaya, kelembapan relatif, dan tekanan mekanis. Sensor ini sering kali merupakan bagian integral dari mesin otonom atau *drone* yang dapat memantau dan merawat tanaman. Banyaknya titik data yang dihasilkan oleh sensor ini dapat digunakan untuk membangun kumpulan data komprehensif

yang menghubungkan atribut pangan atau pertanian yang penting (kualitas, keamanan, dan umur simpan) dengan kondisi lingkungan. Informasi ini kemudian dapat digunakan untuk mengoptimalkan kualitas pangan, meningkatkan keamanan pangan, dan mengurangi limbah pangan dengan mengoptimalkan kondisi yang dialami produk di seluruh rantai pangan, dari lahan pertanian hingga meja makan. Kemajuan dalam ilmu komputer, seperti kecerdasan buatan, pembelajaran mesin, *Internet of Things*, dan teknologi *blockchain* menyediakan alat yang kuat untuk membangun hubungan ini.

6. Robotika Canggih dan Mesin Otonom

Mesin otonom canggih, seperti traktor dan pemanen gabungan semakin banyak digunakan untuk menabur, mengolah, memanen, dan memproses komoditas pertanian yang mengarah pada peningkatan besar dalam efisiensi dan produktivitas praktik pertanian. Mesin ini biasanya berisi teknologi sensor canggih dan sistem penentuan posisi global (GPS) sehingga dapat mengumpulkan informasi lokal yang terperinci tentang tanaman dan kondisi lingkungan.

Pasar panen presisi dilaporkan tumbuh sekitar 11% pada tingkat tahunan dan diperkirakan akan mencapai sekitar USD 17,5 miliar pada tahun 2024 (Claver, 2019). Pasar untuk mesin pertanian otonom ini meningkat, baik di negara maju maupun berkembang dan mencakup perangkat keras, perangkat lunak, dan layanan. Selain meningkatkan efisiensi pertanian, mesin pertanian robot juga membuat pasokan pangan tidak terlalu rentan terhadap kekurangan tenaga kerja dan pandemi. Dengan demikian, penerapan yang lebih luas dari teknologi canggih ini harus mengarah pada kualitas pangan yang lebih baik dan lebih bergizi, sembari mengurangi biaya energi dan limbah pangan. Teknologi baru ini relatif mahal dan saat ini berada di luar jangkauan jutaan petani subsisten di seluruh dunia. Jika praktik pertanian maju ini dapat diadopsi secara global, kuantitas dan kualitas pangan yang tersedia bagi mereka yang paling membutuhkannya akan meningkat. Ini akan membutuhkan peningkatan investasi oleh pemerintah, organisasi filantropi, dan bisnis serta inovasi dalam kebijakan.

7. Meningkatkan Keberlanjutan melalui Metode Pertanian dalam Ruang yang Inovatif

Potensi praktik pertanian dalam ruangan yang inovatif, seperti pertanian vertikal, untuk meningkatkan ketahanan industri pangan, telah dibahas di atas. Namun, pertanian dalam ruangan juga dapat memiliki dampak nyata pada keberlanjutan produksi pangan. Rantai pasok untuk banyak produk pangan yang sangat panjang, sering kali membentang di seluruh dunia. Distribusi bahan pangan dengan melintasi jarak yang jauh, melibatkan penggunaan bahan bakar fosil yang substansial untuk mengangkut dan menyimpan pangan. Mayoritas konsumsi pangan terjadi di pusat kota besar sehingga akan menguntungkan apabila membawa fasilitas produksi pangan lebih dekat ke kota-kota besar guna memperpendek rantai pasok pangan. Beberapa teknologi sedang dikembangkan untuk mencapai tujuan ini, termasuk rumah kaca canggih yang dikendalikan iklim, operasi hidroponik atau aeroponik, dan pertanian vertikal. Pendekatan pertanian inovatif ini menjadi semakin layak secara ekonomi karena kemajuan teknologi dan beberapa kekhawatiran tentang potensi pengganggu pasokan pangan, seperti masalah imigrasi, kontrol perbatasan, konservasi sumber daya tanah dan air, masalah kontaminasi, dan gangguan transportasi.

Operasi pertanian vertikal biasanya membudidayakan tanaman di substrat, bukan tanah di nampan yang ditumpuk vertikal dan memiliki peralatan khusus untuk mengirim air, serta nutrisi pada waktu dan tingkat yang tepat. Tanaman yang terkena diode pemancar cahaya buatan dan spektrum cahaya, dapat disesuaikan untuk mengoptimalkan pertumbuhan dan meningkatkan kualitas nutrisi. Pertanian vertikal biasanya melibatkan otomatisasi tingkat tinggi untuk menanam, memelihara, dan memanen tanaman, serta teknologi sensor canggih dan metode komputasi untuk mengumpulkan dan menganalisis data. Informasi ini dapat digunakan untuk mengoptimalkan kondisi tumbuh dan panen. Pestisida minimal (atau tidak sama sekali) diperlukan selama siklus produksi dalam ruangan. Ketertelusuran pasokan pangan jauh lebih unggul, dengan sumber

pangan nabati dapat ditelusuri kembali ke inci persegi atau benih, jika diperlukan.

Periode pertumbuhan untuk produk yang berkurang secara drastis dalam pertanian vertikal, memungkinkan produksi berjalan dengan cepat, dan beradaptasi dengan permintaan yang berubah. Pertanian vertikal biasanya dekat dengan pasar perkotaan sehingga mampu memasok pedagang sayur lokal dengan produk jejak karbon minimal karena produk tersebut tidak memerlukan banyak transit atau kondisi penyimpanan yang diperpanjang. Misalnya, pertanian vertikal yang dioperasikan bersama oleh CropOne (berbasis di California) dan Emirates Flight Catering, menghasilkan sayuran hijau untuk bandara Dubai dan melaporkan konsumsi air 99% lebih sedikit daripada produksi konvensional.

8. Peningkatan Keberlanjutan melalui Protein Alternatif

Para ilmuwan saat ini sedang mengidentifikasi sumber protein alternatif yang dapat dimasukkan ke dalam pangan, seperti yang berasal dari tanaman, serangga, mikrob, dan kultur jaringan. Salah satu aplikasi teknologi pangan modern yang paling banyak dipublikasikan adalah pembuatan daging nabati. Burger nabati yang dibuat oleh perusahaan, seperti Impossible Foods dan Beyond Meat di Amerika Serikat telah sukses besar secara komersial. Kompleksitas ilmu di balik penciptaan mereka, bagaimanapun, sering tidak dihargai. Perakitan bahan nabati, seperti protein dari kacang polong atau kedelai menjadi sesuatu yang terlihat, berbau, berasa, dan bahkan terdengar seperti daging benar-benar luar biasa. Otot, jaringan ikat, dan jaringan adiposa hewan terdiri atas molekul-molekul spesifik yang tersusun dalam struktur hierarki yang sangat kompleks. Membuat struktur, seperti daging dari protein nabati dan bahan-bahan lain membutuhkan pemahaman sifat-sifatnya pada tingkat dasar dan melibatkan kerja ahli kimia pangan, fisikawan, ahli biologi, insinyur, dan ilmuwan sensorik selama bertahun-tahun.

Para ilmuwan juga mengembangkan produk berbasis mikroba dan serangga untuk menggantikan daging. Banyak dari sumber protein alternatif ini memiliki profil nutrisi yang cukup sebanding dengan daging, seperti pada tingkat makronutrien dan mikronutrien. Namun, banyak pengetahuan teknologi masih diperlukan untuk memproduksi daging secara ekonomis dan berkelanjutan pada skala yang diperlukan. Hal ini guna menggantikan daging konvensional, serta mengubahnya menjadi produk yang diinginkan orang.

D. Keamanan Pangan

Beberapa dekade mendatang akan tercipta tantangan yang signifikan dalam hal keamanan pangan. Rantai pasok pangan yang lebih panjang, sumber pangan baru, teknologi pemrosesan baru, keinginan konsumen untuk pangan olahan minimal dengan lebih sedikit aditif (disebut makanan berlabel bersih), peningkatan permintaan akan pangan segar, alami, dan organik, dan potensi munculnya patogen baru, kemungkinan besar akan menjadi hambatan untuk memberikan pasokan pangan yang aman, andal, dan layak secara ekonomi. Di masa depan, ilmuwan pangan harus terus memberikan pangan yang aman dalam situasi yang menantang. Namun, ini bukan wilayah baru.

Upaya untuk mengirimkan pangan yang aman harus selalu beradaptasi dengan tantangan baru, yaitu (1) kebutuhan pangan untuk memasok tentara yang melakukan perjalanan jarak jauh, menyebabkan pengembangan pengalengan; (2) menyediakan pangan yang aman untuk misi luar angkasa, memunculkan analisis Hazard Analysis Critical Control Point (HACCP); dan (3) pengemasan atmosfer yang dimodifikasi, berasal dari tantangan terkait pengangkutan daging dari Australia dan Selandia Baru ke Inggris pada tahun 1930-an. Kita berharap bahwa tantangan baru akan mengarah pada solusi baru yang inovatif dan dapat diadopsi secara luas di industri pangan masa depan. Misalnya, pangan yang dimodifikasi secara genetik dapat dirancang dengan fitur keamanan bawaan, seperti tanaman yang dirancang untuk menghasilkan peptida atau metabolit antimikrob tingkat pangan endogen mereka sendiri.

Memetakan arah masa depan keamanan pangan bukanlah tugas yang mudah, tetapi kita dapat membuat beberapa prediksi di bawah beberapa judul, termasuk pengolahan dan penilaian risiko, pengembangan bahan, keterlaksanaan, dan metode deteksi baru.

1. Pengolahan Pangan dan Penilaian Risiko

Ada banyak inovasi dalam pengolahan pangan, antara lain teknologi *high-pressure processing* (HPP), *pulsed electric field* (PEF), sonikasi, iradiasi, dan plasma dingin (Morales-de la Pena dkk., 2019). Teknologi ini telah dikembangkan untuk menghindari beberapa kerugian yang tidak diinginkan dalam atribut nutrisi dan sensorik karena proses termal tradisional, sembari memberikan peningkatan keamanan dan umur simpan pada bahan pangan. Banyak dari mereka juga memiliki kebutuhan energi yang lebih rendah dan berkelanjutan. Kemampuan teknologi ini untuk menghancurkan patogen, telah diselidiki dalam berbagai tingkatan (Bahrami dkk., 2020). Saat ini, banyak penilaian keamanan pangan dilakukan dengan sengaja memasukkan galur patogen tertentu (atau campuran galur) ke dalam sistem model, kemudian memaparkannya pada tekanan pemrosesan yang terdefinisi dengan baik.

Kita dapat berharap bahwa sebagian besar penilaian risiko di masa depan akan dilakukan secara komputasi daripada dengan metode spiking dan penghitungan mikrob tradisional. Dapat kita yakini pula bahwa pemahaman kita yang berkembang tentang pelengkap genom lengkap patogen akan memberikan model yang komprehensif dan akurat dari perilaku bakteri di bawah hampir semua stres atau kondisi normal. Model-model ini akan memprediksi nasib patogen apa pun dalam pangan yang memberikan informasi tentang struktur dan komposisinya, serta sifat dari kondisi pemrosesan yang dialaminya. Model serupa juga akan memprediksi nasib mikrob lain yang mungkin ada dalam bahan pangan mentah dan pada seluruh rantai pangan (mikrobioma pangan), memberi kita potensi untuk menghilangkan mikrob patogen sembari mempertahankan mikrob yang bermanfaat. Pengolahan dan penilaian risiko pangan ini harus

mendukung dan mempercepat kemampuan kita untuk merancang dan mengembangkan modalitas pemrosesan baru sembari tetap mempertahankan kepercayaan pada keamanan pasokan pangan.

2. Metode Deteksi

Metode deteksi molekuler berbasis teknologi PCR multitarget dan/atau metode deteksi berbasis asam nukleat lainnya, akan menjadi pusat pemantauan pangan. Usaha ini akan mencakup pengurutan sampel pangan secara *real-time* menggunakan teknologi berdasarkan protokol pengurutan nanopori (Yang dkk. 2020). Metode ini akan memberikan pembacaan instan tentang jumlah dan sifat mikroba pada sampel yang dapat digunakan untuk menginformasikan keputusan ritel dan konsumsi. Diagnostik yang sangat sensitif dan cepat mungkin akan dipelopori dalam ilmu klinis, tetapi akan segera berpindah ke rantai pangan.

Kita juga dapat mengupayakan pengembangan label pintar yang akan mendeteksi metabolit mikroba yang mudah menguap sehingga dapat memantau aktivitas mikroba dalam produk pangan dan memberikan pembacaan waktu nyata tentang keamanan dan kualitasnya daripada mengandalkan masa simpan yang ditentukan dan label “*best before*” yang menyebabkan sejumlah besar pangan terbuang. Bahan kemasan cerdas telah dikembangkan guna memberikan informasi tentang kesegaran daging dan makanan laut. Hal ini hanya didasarkan pada perubahan warna kemasan sebagai respons terhadap pembentukan volatil yang dihasilkan oleh organisme pembusuk.

3. Keterlacakan Pangan

Asal-usul dan sejarah suatu pangan kemungkinan akan memainkan peran yang semakin penting dalam pilihan pangan konsumen di masa depan. Konsumen ingin mengetahui dari mana makanan mereka berasal, serta bagaimana makanan tersebut diangkut, diproses, dan disimpan sehingga mereka dapat menilai keamanan, kualitas, profil nutrisi, dan keberlanjutannya. Usaha untuk menjamin keterlacakan pangan akan membutuhkan pengembangan teknologi inovatif untuk

melacak dan merekam perjalanan produk makanan individu, kemudian memberikan konsumen informasi dalam bentuk yang dapat diakses. Beberapa perusahaan telah mengembangkan teknologi yang dapat digunakan konsumen untuk memindai label suatu produk dan memperoleh informasi tentang nilai gizinya. Beberapa supermarket di Belanda kini memberikan kesempatan kepada konsumen untuk mendapatkan informasi mendetail tentang asal suatu produk dan perjalanan yang diperlukan untuk mencapai toko hanya dengan memindai kode Quick Response (QR) pada labelnya (Gibson, 2019). Misalnya, seseorang mengambil sebotol jus jeruk di rak supermarket dan melihat gambar dari kebun jeruk yang diambilnya dan bagaimana jeruk itu diangkut ke seluruh dunia.

4. Generasi Masa Depan Antimikrob Alami

Secara tradisional, antimikrob yang digunakan untuk mengawetkan pangan secara alami, dihasilkan dari bakteri asam laktat, seperti bakteriosin (misalnya, nisin), asam organik (misalnya, laktat, propionat, asetat), dan buah jeruk (misalnya, sitrat). Upaya perbaikan bahan pengawet diformulasikan dari seleksi dan rekayasa genetik, serta produksi bahan kimia sintetik (Davidson dkk., 2020). Namun, karena kekhawatiran konsumen tentang potensi dampak negatif terhadap kesehatan dan lingkungan dari zat-zat ini, minat untuk mengembangkan antimikrob alami semakin meningkat (Quinto dkk., 2019).

Bakteriosin dan bakteriofag telah berhasil digunakan dalam industri pangan dan mekanisme kerjanya telah dipahami dengan baik. Ada juga minat besar pada minyak esensial dan fitokimia lainnya yang menunjukkan aktivitas antimikrob yang kuat (Rao dkk., 2019). Zat-zat ini sering kali merupakan metabolit sekunder yang dikembangkan oleh tanaman untuk melindungi diri dari mikroba, serangga, atau herbivora. Nanoemulsi minyak atsiri telah terbukti efektif melawan berbagai jenis pembusukan dan organisme patogen yang ditemukan dalam pangan (Donsi & Ferrari, 2016). Formulasi ini terdiri atas tetesan kecil kaya minyak esensial ($d < 200$ nm) yang tersebar dalam air. Ukuran kecil dari tetesan memfasilitasi kemampuan mereka untuk

berinteraksi dengan permukaan mikroorganisme. Mekanisme kerja agen antimikrob kimia ini masih diselidiki.

Di masa depan, lebih banyak perhatian kemungkinan akan diberikan untuk mengembangkan antimikrob spektrum luas yang lebih efektif (misalnya bakteriosin) dan antimikrob selektif (misalnya fag dan pengawet sintetis) yang menghilangkan patogen tertentu tanpa menghancurkan anggota lain dari mikrobioma manusia yang didukung makanan alami serta bermanfaat bagi kesehatan.

5. Teknik Deteksi yang Tidak Ditargetkan

Dalam pasokan pangan modern, bahan mentah dan produk jadi, diangkut ke seluruh dunia sebagai bagian dari jaringan pasokan global yang sangat terintegrasi. Oleh karena itu, konsumen pangan rentan terhadap penipuan dan pemalsuan, misalnya, pemasok yang mengklaim suatu produk berbeda dengan kondisi produk yang sebenarnya. Selain itu, pangan rentan terhadap kontaminasi yang tidak disengaja atau disengaja dengan zat beracun di seluruh rantai pangan. Oleh karena itu, penting untuk memiliki alat analisis yang dapat dengan cepat dan andal mendeteksi pemalsuan atau kontaminasi.

Teknik deteksi bertarget konvensional dirancang untuk mengidentifikasi senyawa dengan struktur kimia yang diketahui, yang biasanya melibatkan instrumen kalibrasi dengan senyawa standar untuk melakukan analisis kualitatif dan/atau kuantitatif (Gao dkk., 2019). Metode ini dapat digunakan untuk mendeteksi komponen pangan yang diketahui, tetapi tidak terlalu berguna dalam mendeteksi pemalsuan pangan atau kontaminasi dengan zat yang tidak diketahui.

Sebaliknya, metode deteksi nontarget tidak mengukur senyawa tertentu, tetapi mendeteksi zat abnormal yang mungkin ada dalam sampel tanpa perlu mengetahui struktur kimianya terlebih dahulu. Metode nontarget umumnya melibatkan deteksi “sidik jari” menggunakan instrumen analitis mapan, seperti kromatografi (kromatografi cair kinerja tinggi dan kromatografi gas), spektroskopi (inframerah, Raman, fluoresensi, dan resonansi magnetik nuklir), spektrometri massa, dan pencitraan hiperspektral, diikuti dengan analisis meng-

gunakan teknik pemrosesan data kemometrik, bioinformatika, atau statistik tingkat lanjut (Gao dkk., 2019). Teknik deteksi yang tidak ditargetkan dapat membedakan buah beri yang diperoleh dari kultivar dan lokasi penanaman yang berbeda (Lu dkk., 2014), protein nonsusu dari protein susu (Lu dkk., 2015), dan oregano yang ditanam secara organik dari padanannya yang diproduksi secara konvensional. Gao dkk. (2019) baru-baru ini meninjau aplikasi lain dari pendekatan deteksi nontarget.

E. Langkah Realisasi

Kemajuan teknologi terjadi pada banyak bidang ilmu pengetahuan yang dengan cepat berdampak pada bagaimana pangan kita diproduksi, didistribusikan, dan dikonsumsi. Ilmuwan dari berbagai disiplin ilmu berkontribusi pada kemajuan ini. Penerapan inovasi teknologi ini digunakan untuk mengatasi tantangan mendesak yang dihadapi pasokan pangan modern, seperti memberi makan populasi dunia yang terus bertambah sambil meminimalkan dampak lingkungan, mengurangi insiden penyakit terkait pola makan, dan meningkatkan keamanan, kualitas, ketahanan, dan keragaman pasokan pangan.

Dimulai dengan revolusi industri, industri manufaktur pangan telah berhasil menghasilkan beragam pangan yang terjangkau, baik, dan lezat. Namun, dampak pangan ini terhadap kesehatan manusia dan lingkungan sering diabaikan. Ke depan akan sangat penting bagi ilmu dan teknologi pangan untuk fokus pada peningkatan aspek gizi dan keberlanjutan pangan. Upaya ini akan membutuhkan perubahan nyata dalam cara ilmuwan pangan bekerja di akademisi, pemerintah, dan industri. Selain itu, ilmu pangan modern akan mendapat manfaat dari peneliti yang bekerja pada disiplin lain yang memanfaatkan perspektif dan keahlian unik mereka untuk mengatasi masalah kritis ini, termasuk ilmuwan pertanian, ahli gizi, insinyur komputer, ahli bioteknologi, ilmuwan polimer, ahli nano, insinyur genetika, profesional medis, psikolog, dan ilmuwan konsumen.

Dalam laporan baru-baru ini, Forum Ekonomi Dunia menyoroti potensi besar yang dimiliki teknologi baru untuk mengubah pasokan

pangan global, tetapi juga mencatat bahwa industri pangan relatif lambat untuk memanfaatkan kekuatan teknologi ini (WEF, 2019). Memang, mereka memperkirakan bahwa investasi dalam *start-up* di bidang pangan dan pertanian kurang dari 10% dibandingkan bidang kesehatan. Oleh karena itu, masih ada kebutuhan mendesak untuk lebih banyak inovasi di sektor pangan, serta peluang fantastis bagi mereka yang ingin berinvestasi di bidang ini.

Singkatnya, pendekatan holistik terhadap sistem pangan global akan diperlukan untuk mengatasi tantangan saat ini sehingga kita dapat menghasilkan pangan yang aman, bergizi, berlimpah, dan terjangkau secara berkelanjutan. Sebagaimana ditekankan dalam laporan Forum Ekonomi Dunia (WEF, 2019), ini akan membutuhkan “kebijakan yang lebih baik, peningkatan investasi, perluasan infrastruktur, pengembangan kapasitas petani, perubahan perilaku konsumen, dan peningkatan pengelolaan sumber daya.” Inovasi dalam teknologi seperti yang disorot dalam buku ini, akan memainkan peran kunci dalam transformasi ini. Di masa depan, kita akan dihadapkan pada berbagai inovasi dalam pengembangan pasokan pangan dengan penerapan teknologi terkini. Dengan demikian, pengenalan industri 4.0 dan perannya dalam keberlanjutan, mulai dibahas di Bab II sebagai konsep dasar dalam memahami teknologi industri 4.0 dan keberlanjutan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB 2

Pengantar Industri 4.0 dan Keberlanjutan

A. Konsep Industri 4.0 dan Keberlanjutan

Pada awal abad ke-21, dunia sedang menyaksikan revolusi industri keempat dan transformasi digital dunia bisnis yang biasa disebut dengan Industri 4.0. Sejak dipublikasikannya istilah “Industri 4.0” pada tahun 2011, transformasi digital yang dituntut oleh Industri 4.0 segera menarik perhatian para industrialis dan pemerintah di seluruh dunia. Sejak revolusi industri pertama pada abad ke-18, dunia telah menghadapi tantangan untuk memproduksi lebih banyak barang dari sumber daya alam yang terbatas dan semakin menipis untuk memenuhi permintaan konsumsi yang terus meningkat sembari membatasi dampak negatif lingkungan dan sosial.

Industri 4.0, bahkan jika tidak ada definisi yang diterima secara universal, kita bisa menganggap Industri 4.0 sebagai “kumpulan teknologi, perangkat, dan proses yang mampu beroperasi secara terintegrasi di sepanjang beberapa fase proses produksi dan sepanjang beberapa tingkat rantai pasok yang memungkinkan produksi mandiri,

operasi terintegrasi, keputusan terdesentralisasi, dan intervensi manusia minimum” (Castelo-Branco dkk., 2019). Teknologi, perangkat, dan proses ini termasuk *Internet of Things* (IoT), *Cyber-Physical Systems* (CPS), robot otonom, teknologi visualisasi (virtual dan *augmented reality*), komputasi awan, teknologi *blockchain*, *big data*, dan manufaktur aditif. Secara konsisten, dampak keberlanjutan Industri 4.0 dan kontribusinya terhadap pembangunan ekonomi, lingkungan, dan sosial yang berkelanjutan, semakin menarik perhatian.

Awalnya, Industri 4.0 dikonseptualisasikan sebagai revolusi keempat yang muncul di industri manufaktur, namun konseptualisasi ini telah berkembang selama beberapa tahun terakhir. Industri 4.0, saat ini melibatkan transformasi digital dari keseluruhan pasar industri dan konsumen, dari munculnya manufaktur pintar, hingga digitalisasi seluruh saluran pengiriman. Secara konsisten, akademisi, kolaborator pemerintah, dan industri menarasikan Industri 4.0 ke digitalisasi dan kecerdasan pabrik, saluran distribusi, dan anggota rantai nilai (Qu dkk., 2019).

Dalam memfasilitasi pemahaman konsep Industri 4.0, para akademisi sebelumnya cenderung menggambarkan fenomena ini berdasarkan prinsip-prinsip desain dan tren teknologi yang mendasarinya. Prinsip-prinsip desain Industri 4.0, yaitu “adalah apa yang secara eksplisit mengatasi masalah ketidakjelasan Industri 4.0 dengan memberikan sistematisasi pengetahuan dan menggambarkan konstituen dari fenomena ini. Prinsip-prinsip desain ini memungkinkan produsen untuk meramalkan kemajuan adaptasi Industri 4.0 dan memberi mereka pengetahuan “bagaimana melakukannya” dalam mengembangkan prosedur dan solusi yang tepat dan diperlukan untuk transisi Industri 4.0 [...] tren teknologi hanya merujuk pada inovasi teknologi digital canggih yang, secara kolektif, memungkinkan munculnya teknologi industri digital baru, dan dikenal sebagai Industri 4.0.”

Untuk mencapai prinsip-prinsip desain yang mendasarinya, transformasi digital di bawah Industri 4.0 bergantung pada implementasi dan integrasi berbagai Teknologi Informasi, Digital, dan Operasi

(TIDO), sederhana hingga canggih, seperti sensor industri, pengontrol industri, kendaraan berpandu otomatis, robot, *augmented* dan *virtual reality* (AVR), analitik *big data* (data besar), komputasi awan, *Internet of Services* (IoS), desain dan manufaktur berbantuan komputer dengan komputasi kinerja tinggi, dan kecerdasan buatan (AI). Banyak dari TIDO yang memungkinkan Industri 4.0 tersedia untuk industrialis selama empat dekade terakhir (Chen, 2021). Namun, mereka baru-baru ini mencapai kedewasaan dalam hal integrabilitas dan interoperabilitas yang diperlukan untuk digitalisasi.

Keberlanjutan adalah konsep luas yang mencakup sebagian besar aspek dunia manusia. Keberlanjutan tidak terbatas pada lingkungan karena juga melibatkan pelestarian sumber daya ekonomi dan sosial. Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) mendefinisikan keberlanjutan sebagai gerakan untuk memastikan kesejahteraan yang lebih baik dan lebih berkelanjutan untuk semua, termasuk generasi mendatang yang bertujuan untuk mengatasi masalah-masalah global abadi berkaitan dengan ketidakadilan, ketidaksetaraan, perdamaian, perubahan iklim, polusi, dan degradasi lingkungan. Meskipun keberlanjutan adalah konsep yang relatif baru, akarnya ada pada gerakan abadi, seperti konservasionisme atau keadilan sosial-ekonomi.

Keberlanjutan memiliki literatur yang kaya, dan akademisi telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap konseptualisasi dan perwujudan dari tiga pilar yang mendasari keberlanjutan, yaitu lingkungan, ekonomi, dan sosial. Kelestarian lingkungan berkaitan dengan menjaga keseimbangan sistem lingkungan bumi, keseimbangan konsumsi dan pelestarian sumber daya alam, serta integritas ekologi (Glavič & Lukman, 2007). Keberlanjutan ekonomi menyangkut pertumbuhan ekonomi jangka panjang sembari melestarikan sumber daya lingkungan dan sosial. Dilihat dari perspektif ini, pertumbuhan modal ekonomi tidak boleh mengorbankan penurunan modal alam atau sosial. Dengan demikian, pertumbuhan ekonomi tidak boleh mengabaikan keseimbangan sumber daya alam, ekosistem, kesejahteraan sosial, dan distribusi kekayaan. Keberlanjutan sosial

adalah proses mengenali dan mengelola dampak positif dan negatif bisnis, lingkungan, ekonomi, dan teknologi pada manusia.

Tujuan akhir keberlanjutan sosial adalah terciptanya komunitas yang sehat dan layak huni, yaitu setiap orang dilindungi dari diskriminasi dan memiliki akses ke hak asasi manusia universal dan fasilitas dasar, seperti keamanan atau layanan kesehatan (Dempsey dkk., 2011). Keberlanjutan sangat diperlukan karena alasan sederhana, yaitu ekosistem bumi dan kualitas kehidupan manusia yang diinginkan tidak dapat dipertahankan tanpa manusia merangkul keberlanjutan. Secara konsisten, dampak keberlanjutan Industri 4.0 patut mendapat perhatian penuh akademisi mengingat revolusi industri sebelumnya menghasilkan perubahan ekonomi, lingkungan, dan sosial yang dramatis serta tidak terduga. Meskipun masih dalam tahap awal, konsekuensi yang tidak terduga atau tidak diinginkan dari Industri 4.0 dan transformasi digital pada keberlanjutan *triple bottom line*, diharapkan menjadi konsekuensial.

Perkembangan Industri 4.0 menjadi perdebatan luas tentang keberlanjutan industri. Seperti yang disampaikan sebelumnya, keberlanjutan adalah konsep holistik yang telah didefinisikan dalam banyak cara. Definisi paling populer kembali ke laporan Brundtland (1988) yang menciptakan istilah pembangunan berkelanjutan, yang berarti “pembangunan yang memenuhi kebutuhan saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri”. Seiring jalan, keberlanjutan telah ditafsirkan sebagai upaya untuk menyeimbangkan kinerja ekonomi, sosial, dan lingkungan, yaitu *triple bottom line* (TBL). Dari perspektif perusahaan, keberhasilan jangka panjang perusahaan bergantung pada ketiga dimensi keberlanjutan. Ketiga pilar ini mengintegrasikan berbagai sudut pandang keberlanjutan perusahaan, seperti tanggung jawab sosial perusahaan atau pengelolaan lingkungan.

Industri 4.0 dan keberlanjutan telah mendapatkan momentum dalam perdebatan akademis, manajerial, dan kebijakan. Studi terbaru telah berusaha menghubungkan Industri 4.0 dan keberlanjutan. Industri 4.0 dapat mendukung optimalisasi proses dan berkontribusi

positif terhadap kinerja kelestarian lingkungan dengan penggunaan sumber daya yang efisien dan pengurangan produksi limbah. Atau, hal itu dapat menyebabkan peningkatan produksi limbah—limbah elektronik, sebagai contoh—dan permintaan sumber daya energi yang lebih tinggi.

Dalam ekosistem Industri 4.0, komputer yang saling terhubung, material cerdas, dan mesin cerdas berkomunikasi satu sama lain, berinteraksi dengan lingkungan, dan akhirnya membuat keputusan dengan keterlibatan manusia yang minimal (Gilchrist, 2016). Keterhubungan digital dan pengembangan, serta berbagi informasi, sebagai kekuatan sebenarnya dari Industri 4.0, mungkin memiliki dampak yang kontradiktif terhadap keberlanjutan *triple bottom line*. Oleh karena itu, mendigitalkan proses manufaktur dan bisnis serta menerapkan mesin dan perangkat yang lebih cerdas, dapat menawarkan banyak keuntungan, seperti produktivitas, efisiensi sumber daya, dan pengurangan limbah (Tortorella & Fettermann, 2018). Sebaliknya, peningkatan tingkat produksi berkat automasi industri akan dikaitkan dengan konsumsi energi yang lebih tinggi serta peningkatan masalah polusi.

Apabila dilihat dari perspektif pembangunan sosial, transformasi digital dan restrukturisasi industri diperkirakan akan sangat mengganggu pasar tenaga kerja. Para ahli percaya, digitalisasi dan munculnya teknologi hemat tenaga kerja (misalnya, robot cerdas, kendaraan nirsupir, dan solusi *cloud*) akan menghilangkan sebagian besar pekerjaan berketerampilan rendah sembari menciptakan peluang kerja yang tak terhitung jumlahnya di berbagai bidang, seperti teknik automasi, desain sistem kontrol, pembelajaran mesin, dan rekayasa perangkat lunak (Brougham & Haar, 2018).

B. Menuju Industri 4.0: Mengaktifkan Teknologi

Istilah Industri 4.0 diciptakan oleh asosiasi Jerman “Industrie 4.0” pada tahun 2011. Asosiasi yang terdiri dari eksekutif, cendekiawan,

dan pembuat kebijakan, mengisyaratkan revolusi industri keempat berdasarkan digitalisasi proses perusahaan. Ide utama yang mendasari Industri 4.0 adalah menjalankan bisnis dengan mengadopsi teknologi digital yang dapat membantu perusahaan untuk membuat koneksi antara mesin, sistem pasokan, fasilitas produksi, produk akhir, dan konsumen mereka untuk mengumpulkan dan berbagi informasi pasar, serta operasional secara *real-time*. Pemerintah Jerman pertama-tama mendukung visi Industri 4.0 yang diimplementasikan ke dalam “High-Tech Strategy 2020 for Germany”. Setelah itu, beberapa negara meluncurkan inisiatif Industri 4.0. Misalnya, Inggris memprakarsai “UK Catapult-Manufaktur Bernilai Tinggi”. Program ini adalah rencana strategis yang mencakup universitas dan pelaku industri untuk mempromosikan pengenalan teknologi digital di industri manufaktur Inggris. Selain itu, strategi “Manufacturing USA” Amerika, “Industrie du Futur” Prancis, dan “Smart Industry” Belanda memberikan manfaat fiskal, memfasilitasi pembiayaan dan kredit pajak kepada perusahaan yang bertujuan merancang pendekatan industri sesuai dengan visi Industri 4.0. Baru-baru ini, Kementerian Pembangunan Ekonomi Italia meluncurkan rencana Italia untuk Industri 4.0 dengan tujuan meningkatkan pengeluaran R&D publik dan swasta untuk digitalisasi bisnis.

Ringkasnya, Industri 4.0 bertujuan untuk meningkatkan digitalisasi sehingga integrasi proses perusahaan, baik secara horizontal (di seluruh area fungsional) maupun secara vertikal (di seluruh rantai nilai, mulai dari pengembangan produk dan pembelian melalui manufaktur, hingga distribusi dan layanan pelanggan) bisa berjalan dengan lebih baik lagi. Dengan cara ini, semua data tentang operasi, logistik masuk/keluar, kebutuhan pasar, dan interaksi produk-konsumen akan tersedia secara *real-time*. Akibatnya, perusahaan digital akan bekerja sama dengan konsumen dan pemasok dalam ekosistem digital industri yang memungkinkan mereka untuk mengelola antarmuka di antara *Supply Chain Management* (SCM) dan fungsi pemasaran dengan lebih baik.

Tentu saja banyak teknologi digital diperlukan untuk mencapai tujuan ini, dan teknologi ini harus menjamin interoperabilitas antarberagam sistem teknologi informasi (TI) guna meminimalkan biaya implementasi dan waktu pemrosesan informasi. Oleh karena itu, perlu diidentifikasi secara jelas solusi yang paling relevan untuk mendukung transisi menuju Industri 4.0.

Upaya pertama telah dilakukan oleh Boston Consulting Group (BCG) (Rüßmann dkk., 2015), PricewaterhouseCoopers (PwC) (PwC, 2016), dan Kementerian Pembangunan Ekonomi Italia (Calenda, 2016), yang masing-masing menyarankan seperangkat teknologi yang memungkinkan untuk Industri 4.0. Di antara ketiga klasifikasi, ada banyak kesamaan. Klasifikasi oleh Rüßmann dkk. (2015) dan Calenda (2016) sangat cocok dalam hal penamaan dan makna. Klasifikasi oleh PwC (2016) memiliki kesamaan lima teknologi digital yang disediakan oleh Rüßmann dkk. (2015) dan Calenda (2016), yaitu manufaktur aditif, *augmented reality*, komputasi awan, keamanan siber, dan analitik *big data*. Namun, PwC (2016) juga mengacu pada teknologi untuk profil pelanggan yang dapat dikaitkan dengan solusi analitik *big data* (Calenda, 2016), dan beberapa teknologi spesifik (misalnya, sensor dan perangkat seluler) yang mungkin terkait dengan *Industrial Internet of Solusi Things*, menurut Rüßmann dkk. (2015) dan Calenda (2016).

Dengan demikian, pada semua klasifikasi, muncul kebutuhan untuk mengamankan arus informasi dengan teknologi keamanan siber. Daftar terakhir dari teknologi yang memungkinkan adalah manufaktur canggih; manufaktur aditif; *augmented reality*; simulasi; komputasi awan; IoT industri; keamanan *cyber*; dan analitik big data dan profil pelanggan. Detail lebih lanjut disampaikan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Teknologi Keamanan Siber

Teknologi	Deskripsi
Manufaktur canggih	Manufaktur canggih mengacu pada kemajuan teknologi terbaru yang dapat diadopsi perusahaan untuk memproduksi produk dan/atau proses perusahaan yang lebih baik. Contoh dari teknologi ini adalah robotika canggih, solusi CAD, CAE, CAM, dan solusi otomatisasi (Waldeck, 2014).
Manufaktur aditif	Manufaktur aditif mencerminkan serangkaian teknologi untuk mengembangkan objek tiga dimensi lapis demi lapis di bawah kendali komputer. Teknologi yang paling representatif di bidang ini adalah pencetakan 3D.
<i>Augmented reality</i> (Realitas ditambah)	Sistem berbasis <i>augmented-reality</i> adalah solusi teknologi yang saat ini masih dalam masa pertumbuhan. Mereka mengubah lingkungan di sekitar pekerja menjadi antarmuka digital dengan menempatkan objek virtual di dunia nyata untuk meningkatkan persepsi seseorang tentang realitas saat ini.
Simulasi	Simulasi berkaitan dengan teknologi yang akan banyak digunakan dalam operasi pabrik untuk mensimulasikan teknik produksi sehingga memungkinkan operator untuk menguji dan mengoptimalkan pengaturan mesin untuk lini produk berikutnya sebelum pergantian fisik.
Komputasi awan	Komputasi awan memungkinkan pembagian sumber daya perangkat lunak dan perangkat keras TI melalui internet sehingga informasi dapat dengan mudah disimpan dan diakses dari jarak jauh oleh beragam aktor.
Industrial IoT	Industrial IoT mengacu pada penggunaan teknologi IoT dalam proses yang berfokus pada permintaan dan pasokan. Hal ini mendukung interoperabilitas antara perangkat dan mesin yang menggunakan protokol dan memiliki arsitektur berbeda sehingga memungkinkan untuk memiliki data waktu nyata di seluruh rantai nilai.

Teknologi	Deskripsi
Keamanan <i>Cyber</i>	Dengan peningkatan konektivitas dan penggunaan sumber daya TI bersama, kebutuhan untuk melindungi informasi penting tumbuh secara dramatis. Dengan demikian, teknologi yang menghindari ancaman keamanan siber menyediakan komunikasi yang aman dan andal sangat penting
Analisis <i>Big Data</i> dan profil pelanggan	Dalam konteks Industri 4.0, sejumlah besar data berasal dari berbagai sumber, misalnya, peralatan dan sistem produksi, pelaku rantai pasokan, dan sistem manajemen pelanggan. Analisis <i>Big Data</i> dan pembuatan profil pelanggan mencakup solusi teknologi yang memungkinkan analisis kumpulan data besar dan mendukung pengambilan keputusan <i>real-time</i> .

C. Hubungan antara Industri 4.0 dan Keberlanjutan

Hubungan antara Industri 4.0 dan keberlanjutan mendapat banyak perhatian dalam literatur dan telah ditinjau menggunakan perspektif yang berbeda. Untuk menjelaskan perlunya pekerjaan ini dan untuk memosisikannya dengan lebih baik, tinjauan sebelumnya dirangkum dalam bagian ini, mengikuti pendekatan yang diadopsi oleh (Brandenburg dkk., 2014) dalam studi mereka tentang model kuantitatif untuk manajemen rantai pasokan yang berkelanjutan.

Kamble dkk. (2018) menyajikan tinjauan umum tentang Industri 4.0. Mereka mengembangkan kerangka kerja dan mengusulkan agar teknologi Industri 4.0 membantu integrasi proses (manusia-mesin) yang mengarah pada keberlanjutan ekonomi dan lingkungan, serta otomatisasi dan keselamatan proses manufaktur. Mereka menghubungkan teknologi tunggal dengan hasil ekonomi (biaya, fleksibilitas, produktivitas, dll.). Dalam beberapa kasus, mereka menunjukkan beberapa hubungan langsung antara teknologi tunggal dan lingkungan (misalnya, IoT yang mengarah pada efisiensi energi; manufaktur aditif yang mengurangi konsumsi bahan mentah), serta praktik sosial (misalnya, teknologi yang dapat dipakai dan kacamata pintar yang membuat tempat kerja lebih aman).

Terdapat tiga ulasan yang berfokus pada hubungan antara Industri 4.0 dan keberlanjutan di bidang tertentu, yaitu rantai pasokan/logistik dan manufaktur. Bag dkk. (2018) meninjau cara merealisasikan keberlanjutan rantai pasok di Industri 4.0 dan mengidentifikasi faktor pendukung yang relevan, seperti dukungan pemerintah, kolaborasi dengan lembaga penelitian dan universitas, pertukaran informasi antarpelaku rantai pasokan, standar teknologi, dan komitmen manajemen yang mengarah pada peningkatan keberlanjutan dalam konteks Industri 4.0. Akibatnya, mereka menyediakan kerangka kerja yang menyajikan faktor-faktor pendukung untuk rantai pasok yang berkelanjutan.

Birkel & Müller (2021) mempelajari dampak Industri 4.0 pada *triple bottom line* (TBL) dalam konteks perencanaan dan pengadaan, logistik dan intralogistik, dan logistik daur ulang. Mereka berfokus pada Industri 4.0 secara keseluruhan, tanpa mempertimbangkan teknologi secara detail. Mereka menunjukkan beberapa teknologi, tetapi hanya sedikit menunjukkan hubungan langsung antara teknologi dan keberlanjutan, (1) kembar digital yang memungkinkan desain dan simulasi visual, mendukung desain produk dan produksi di sepanjang rantai pasok, dan membantu mengurangi konsumsi sumber daya; (2) IoT yang membantu mengoordinasikan operasi logistik dengan permintaan konsumen agar seluruh proses lebih fleksibel; dan (3) virtual dan *augmented reality*, dan sistem bantuan lainnya yang mendukung pekerja mengurangi tugas berulang dan berbahaya yang mengarah pada pengurangan stres dan kepuasan yang lebih tinggi.

Selanjutnya, penulis meninjau keuntungan Industri 4.0 untuk ekonomi sirkular dan keberlanjutan (ekonomi & lingkungan) dan beberapa kemungkinan kerugian, misalnya, sumber daya dan energi yang dibutuhkan untuk daur ulang (Tabel 2.2). Mereka menyoroti bahwa khususnya manufaktur aditif memiliki beberapa kontroversi. Di satu sisi, teknologi ini membatasi pemborosan dan mengurangi proses logistik, sedangkan di sisi lain, proses produksi itu sendiri mengonsumsi lebih banyak energi per bagian yang diproduksi daripada proses konvensional.

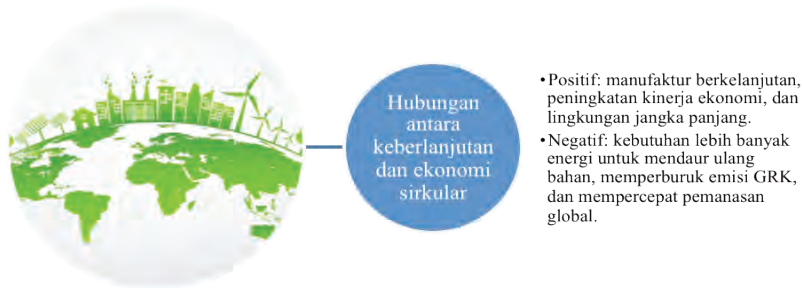
Tabel 2.2 Perbedaan antara Keberlanjutan dan Ekonomi Sirkular

	Keberlanjutan	Ekonomi Sirkular
Asal usul istilah	Gerakan lingkungan, LSM, lembaga nirlaba dan antarpemerintah, dan prinsip-prinsip dalam sistem silvikutur dan koperasi.	Aliran pemikiran yang berbeda, seperti <i>cradle-to-cradle</i> ⁴ , implementasi peraturan oleh pemerintah, lobi oleh LSM, seperti EMF, dan penyertaan dalam agenda politik, misalnya Europe Horizon 2020.
Tujuan	Terbuka, banyak tujuan tergantung pada agen yang dipertimbangkan dan minatnya.	<i>Loop</i> tertutup, idealnya menghilangkan semua input sumber daya ke dalam dan menginput yang terbuang dari sistem.
Motivasi utama	Adaptif dan dampak yang bersifat inklusif.	Penggunaan sumber daya dan limbah yang lebih baik (dari linier ke sirkular)
Sistem apa yang diprioritaskan?	<i>Triple bottom line</i> (horizontal)	Sistem ekonomi (hierarki)
Untuk keuntungan siapa?	Lingkungan, ekonomi, dan masyarakat pada umumnya.	Pelaku ekonomi adalah inti, menguntungkan ekonomi dan lingkungan. Masyarakat mendapat manfaat dari perbaikan lingkungan dan tambahan, serta asumsi tertentu, seperti lebih banyak tenaga kerja manual atau perpajakan yang lebih adil.
Bagaimana pemahaman mereka disebarkan?	Memberikan <i>framing</i> yang dapat disesuaikan dengan konteks dan aspirasi yang berbeda.	Menekankan manfaat ekonomi dan lingkungan.

⁴ *Cradle-to-cradle* (C2C) adalah cara merancang produk atau proses yang bekerja lebih, seperti sistem alami. Metode perancangan ini dimaksudkan untuk menggantikan pendekatan memproduksi-beli-buang yang dimulai dengan bahan baku baru yang ditambang dari bumi dan diakhiri dengan tumpukan sampah. Pendekatan ini dimodelkan setelah proses alam yang telah lama berevolusi, rendah limbah, dan hemat energi.

	Keberlanjutan	Ekonomi Sirkular
Jangka waktu perubahan	Tanpa batas	Batas teoretis untuk optimasi dan aspek praktis untuk implementasi, dapat menetapkan ambang batas <i>input</i> dan sumber daya yang terbangun untuk keberhasilan implementasi ekonomi sirkular..
Persepsi tanggung jawab	Terdapat pembagian tanggung jawab, tetapi tidak didefinisikan dengan jelas.	Bisnis swasta dan pemerintah.
Komitmen, tujuan, dan kepentingan di balik penggunaan istilah	Penyelarasan kepentingan antarpemangku kepentingan, misalnya lebih sedikit limbah baik untuk lingkungan, keuntungan organisasi, dan harga konsumen.	Keuntungan ekonomi/ finansial bagi perusahaan dan lebih sedikit konsumsi sumber daya, dan polusi bagi lingkungan.

Sumber: Geissdoerfer dkk. (2017)



Gambar 2.1 Tipe Hubungan antara Keberlanjutan dan Ekonomi Sirkular

Dalam pembahasan hubungan antara ekonomi sirkular dan keberlanjutan, Rashid dkk. (2013) menggambarkan sirkularitas dalam model bisnis dan rantai pasok sebagai prasyarat untuk manufaktur berkelanjutan yang pada gilirannya diperlukan untuk peningkatan kinerja ekonomi dan lingkungan dari negara-negara industri dan berkembang. Ekonomi sirkular juga bisa berperan sebagai elemen penting dari pembangunan berkelanjutan.

Hubungan antara ekonomi sirkular dan keberlanjutan setidaknya tampak dalam dimensi ekonomi dan lingkungan, Bakker dkk. (2014) menganggap sirkularitas mutlak diperlukan untuk mempertahankan output ekonomi. Pendekatan serupa juga dilakukan oleh Program Lingkungan Perserikatan Bangsa-Bangsa (UNEP, 2006) yang menghadirkan ekonomi sirkular sebagai kondisi yang diperlukan untuk menjaga pertumbuhan ekonomi secara berkelanjutan.

Jenis lain dari hubungan antara ekonomi sirkular dan keberlanjutan, diidentifikasi oleh Nakajima (2000) yang menggambarkan sirkularitas dan sistem berbasis layanan sebagai kondisi yang diperlukan, tetapi tidak cukup untuk sistem yang berkelanjutan. Kondisi lain, seperti perubahan gaya hidup, harus mengiringi sistem *loop* tertutup⁵ untuk mengejar keberlanjutan jangka panjang.

Komisi Eropa (2014) menegaskan sistem ekonomi sirkular sebagai manfaat untuk dimensi keberlanjutan yang berbeda, seperti produktivitas sumber daya, penciptaan lapangan kerja, dan pertumbuhan PDB, tetapi tidak menguraikan apakah ini merupakan kondisi yang diperlukan atau cukup atau bagaimana kaitannya dengan konsep lain yang dapat mendorong keberlanjutan.

OECD (2009) memiliki pandangan hierarkis dan menganggap sistem manufaktur *loop* tertutup lebih berkelanjutan daripada kebanyakan konsep manufaktur lainnya karena terdiri dari lebih banyak target dan mekanisme *ecoinnovation*. Satu-satunya pengecualian yang dipandang lebih berkelanjutan dalam prioritas ini adalah kerangka ekologi industri.

Hubungan negatif antara sirkularitas dan keberlanjutan juga disorot. Tidak hanya manfaat potensial, tetapi juga biaya sistem sirkular yang harus diseimbangkan untuk menghindari penciptaan

⁵ Manajemen rantai pasok *loop* tertutup adalah desain, kontrol, dan pengoperasian sistem untuk memaksimalkan penciptaan nilai selama seluruh siklus hidup produk dengan pemulihan nilai dinamis dari berbagai jenis dan volume pengembalian dari waktu ke waktu. Hal ini jelas merupakan definisi dalam bidang bisnis. Kegiatan yang berlangsung di CLSCM adalah pengumpulan, inspeksi/pemisahan, pemrosesan ulang, pembuangan, dan pendistribusian ulang.

nilai negatif. Berbagai masalah yang dibawa oleh ekonomi sirkular, di antaranya adalah ketidakmungkinan teknis dari lingkaran tertutup dalam kombinasi dengan permintaan yang meningkat atau masalah dengan energi yang dibutuhkan untuk mendaur ulang bahan. Energi dan dampaknya ini mungkin lebih tinggi untuk banyak bahan daripada efek lingkungan keseluruhan dari memperoleh bahan dari sumber konvensional, seperti pertambangan. Dengan demikian, ekonomi sirkular dapat memperburuk emisi gas rumah kaca dan sebagai akibatnya, akan mempercepat pemanasan global. Oleh karena itu, pendekatan yang lebih pragmatis diperlukan, di mana efisiensi material dan bentuk pengurangan *input* lainnya harus memiliki prioritas lebih tinggi daripada ekonomi sirkular.

Sama dengan dua ulasan yang disebutkan di atas, Machado dkk. (2020) melihat Industri 4.0 sebagai konsep keseluruhan dan tidak fokus pada teknologi tertentu. Mereka menyebutkan hubungan dengan beberapa praktik (berkelanjutan), seperti manufaktur aditif yang membantu ekonomi sirkular, *big data* dan analisis untuk pemeliharaan prediktif, serta IoT yang mendukung manajemen siklus hidup produk. Lebih lanjut, mereka juga mengutip beberapa teknologi dan dampaknya terhadap kelestarian lingkungan, misalnya IoT dan sensor pintar/pengukur pintar atau simulasi untuk efisiensi energi yang lebih besar. Secara keseluruhan, mereka menyatakan bahwa beberapa teknologi (misalnya integrasi horizontal dan vertikal, IoT, *big data*, dan analitik) secara langsung terkait dengan lingkungan (efisiensi sumber daya dan energi) dan keberlanjutan ekonomi, tetapi mereka tidak meninjaunya secara komprehensif.

Ejsmont dkk. (2019) melakukan analisis jaringan bibliometrik dan mengusulkan kerangka kerja yang menghubungkan “pilar Industri 4.0”, seperti digitalisasi, data *real-time*, IoT, CPS, dan *big data* ke area yang dapat berkontribusi pada keberlanjutan, seperti manufaktur, produk siklus hidup, rantai pasokan dan rantai nilai, dan ekonomi sirkular. Lebih lanjut, mereka menghubungkan pilar teknologi yang disebutkan di atas ke TBL, tetapi dengan beberapa pengecualian, (IoT untuk efisiensi sumber daya) mereka tidak menghubungkan teknologi

tunggal IoT. Dengan demikian, mereka tidak secara komprehensif mengelompokkan teknologi dan kemungkinan dampak kinerja lingkungan dan sosial.

Demikian pula, Furstenau dkk. (2020) mengidentifikasi beberapa klaster, di mana Industri 4.0 dan keberlanjutan terkait berdasarkan analisis jaringan bibliometrik. Mereka menunjukkan bahwa Industri 4.0 sebagian besar dapat meningkatkan kinerja ekonomi dan lingkungan, misalnya mendukung efisiensi energi atau energi terbarukan dan memastikan kualitas dalam industri pangan. Selain itu, klaster ini menyiratkan bahwa Industri 4.0 dapat mendukung praktik berkelanjutan, seperti daur ulang, ekonomi sirkular, dan pemeliharaan. Penulis menghubungkan teknologi (seperti manufaktur aditif) dengan praktik (seperti daur ulang) yang dapat mengurangi dampak ekonomi dan lingkungan (misalnya, konsumsi bahan mentah, waktu ke pasar, dan biaya produksi), tetapi mereka tidak meninjau secara komprehensif hasil berkelanjutan dalam rinci.

Dalam konteks Industri 4.0, Ghobakhloo (2020) mengidentifikasi serangkaian fungsi keberlanjutan yang terkait dengan adopsi Industri 4.0. Fungsi keberlanjutan tersebut berupa kebaruan dan inovasi model bisnis, peningkatan profitabilitas, emisi karbon/gas berbahaya, keberlanjutan energi, dan pengembangan sumber daya manusia, terutama menyediakan indikator ekonomi, untuk mempelajari bagaimana semua ini mungkin terkait dan saling bergantung. Industri 4.0 dan teknologi masih jarang dikaitkan dengan indikator kinerja lingkungan dan sosial.

Sebaliknya, Margherita dan Braccini (2020) hanya mengulas artikel berbasis empiris dan menunjukkan beberapa hubungan langsung antara teknologi dan TBL, terutama yang berfokus pada dimensi ekonomi. Beberapa contoh menunjukkan dampak teknologi tunggal terhadap lingkungan (CPS dan data besar untuk pengurangan konsumsi energi, CPS untuk konsumsi air yang lebih sedikit). Seperti ulasan lainnya, mereka tidak secara sistematis mempertimbangkan teknologi dan dampak tunggal. Singkatnya, ulasan sebelumnya telah melihat Industri 4.0 dan keberlanjutan dari sudut yang berbeda

(misalnya manajemen rantai pasok/logistik, produksi berkelanjutan, dan pemeliharaan berkelanjutan) dan tingkat detail yang berbeda, tetapi berfokus pada konsep Industri 4.0 dalam konteks keberlanjutan, bukan pada teknologi yang mendasarinya.

D. Industri 4.0 dan Praktik Keberlanjutan

Praktik keberlanjutan diklasifikasikan ke dalam tujuh kategori utama, yaitu produksi berkelanjutan, pembelian berkelanjutan, pengukuran dan manajemen kinerja berkelanjutan, rantai pasokan siklus tertutup, tata kelola berkelanjutan, pemasaran berkelanjutan, dan desain berkelanjutan (Rajeev dkk., 2017). Teknologi Industri 4.0, meliputi IoT, CPS, kolaborasi robot-manusia, manufaktur aditif, AI, *big data*, komputasi awan, *augmented reality*, dan teknologi *blockchain* (European Commission, 2018).

CPS dan komputasi awan secara konseptual telah banyak dibicarakan untuk mendukung upaya produksi yang berkelanjutan. Salah satu keuntungannya adalah untuk memantau kinerja keberlanjutan sistem produksi secara kuantitatif dan kualitatif. Penggunaan sensor berkontribusi untuk akuisisi informasi. IoT juga sangat terkait dengan pengumpulan informasi untuk produksi yang berkelanjutan. Demikian pula dengan penggunaan robot kolaboratif yang memiliki potensi manfaat untuk manufaktur berkelanjutan karena robot kolaboratif dapat mendeteksi kedekatan manusia dan mengurangi risiko keselamatan bagi mereka.

Terdapat argumen untuk Industri 4.0 yang mendukung pengambilan keputusan, proses berbagi informasi, dan data yang lebih baik untuk memfasilitasi pembelian berkelanjutan (Ghadimi dkk., 2019). Interkoneksi dan transparansi informasi *real-time* untuk evaluasi pemasok berkelanjutan secara berkala merupakan dasar untuk meningkatkan kegiatan ini. Misalnya, penggunaan produk berbasis IoT yang cerdas dan rantai pasokan yang mendukung *blockchain*, dapat mendukung pembelian berkelanjutan dengan cara membantu keputusan akuisisi yang lebih baik.

Tindakan dan instrumen berbasis industri 4.0 dapat memperkuat pengukuran dan manajemen kinerja yang, misalnya melalui dukungan alat AI (Allaoui dkk., 2019). Platform berbasis *cloud* dapat mengumpulkan data siklus hidup dan berbagi informasi di antara anggota rantai pasok. Proses berbagi ini dapat memungkinkan penilaian siklus hidup produk yang fleksibel dan responsif. Selain itu, penilaian siklus hidup berbasis *blockchain* dapat membantu menangani data rantai pasokan dengan mengintegrasikan teknologi pintar lainnya, seperti IoT dan *big data*. Demikian pula, CPS dapat digunakan untuk pemantauan kinerja dalam intralogistik. Lebih lanjut, kerangka Industri 4.0 berbasis *cloud* dapat meningkatkan pengukuran kinerja keberlanjutan dengan mendukung aktivitas pelaporan.

Industri 4.0 dapat memfasilitasi berbagi informasi di antara anggota rantai pasok untuk kegiatan rantai pasok siklus tertutup (Gu dkk., 2019). Perspektif siklus tertutup juga telah diperluas ke prinsip-prinsip ekonomi sirkular. Industri 4.0—khususnya kemampuan *big data*—secara teoretis dapat dikatakan mendukung model ekonomi sirkular ReSOLVE.

Model ReSOLVE termasuk dalam strategi pengembangan model bisnis, yaitu regenerasi, berbagi, pengoptimalan, siklus, virtualisasi, dan pertukaran manfaat dari berbagai teknologi Industri 4.0; lebih lanjut untuk mencapai pengambilan keputusan yang lebih berkelanjutan dalam manajemen operasi. IoT juga telah ditekankan untuk membantu mengembangkan jalur menuju ekonomi sirkular dan rantai pasok siklus tertutup, terutama dalam mendukung konsep pembuatan nol limbah. IoT dapat memberikan informasi produk secara *real-time* berupa penggunaan atau data lokasi dan memungkinkan aktivitas akhir masa pakai produk untuk mendukung aktivitas perbaikan atau daur ulang.

Sementara itu, ada banyak studi yang meneliti kemungkinan keterkaitan Industri 4.0 dan keberlanjutan pada tingkat organisasi atau antarorganisasi. Komputasi awan dapat membantu tata kelola fasilitas yang berkelanjutan, seperti gedung, rumah, mobil, dan peralatan. Tata kelola yang berkelanjutan dapat didukung oleh data dari pe-

mantauan digital dan dibagikan dalam sistem pemangku kepentingan yang kompleks. Informasi ini membutuhkan teknik untuk mengelola sejumlah besar data. Pendekatan teknis lainnya dapat digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan kebijakan secara efektif, yang merupakan aspek penting dari tata kelola yang berkelanjutan. AI adalah elemen pendukung lainnya untuk mengintegrasikan teknologi Industri 4.0 ke dalam tata kelola ini.

IoT dapat sangat memengaruhi pemasaran berkelanjutan. IoT dapat mengarahkan konsumen ke keputusan pembelian yang lebih berkelanjutan dan dapat mendukung tindakan pemasaran hijau. IoT juga dapat menjadi instrumen yang cocok untuk pendidikan konsumen hijau.

Selanjutnya, Industri 4.0 dapat meningkatkan desain ramah lingkungan. Berbagai informasi di antara pemangku kepentingan dan pertukaran data selama fase pengembangan dan manufaktur memang dapat menyediakan data yang diperlukan untuk membuat produk dan proses produksi lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Secara keseluruhan, penerapan teknologi industri 4.0 secara konseptual atau empiris menunjukkan suatu hubungan. Banyak studi bersifat konseptual karena beberapa teknologi saat ini tidak memiliki kemampuan untuk sepenuhnya mengatasi masalah keberlanjutan sehingga memerlukan pengembangan dan integrasi lebih lanjut.

E. Industri 4.0 dan Kinerja Keberlanjutan

Saat ini, dalam banyak literatur terdapat dua tren utama berkaitan dengan industri 4.0 dan keberlanjutan. Pertama, Industri 4.0 terkait kinerja keberlanjutan. Kedua, keberlanjutan sebagai anteseden untuk adopsi Industri 4.0.

Kategori kinerja keberlanjutan untuk dampak lingkungan dan sosial berasal dari standar *Global Report Initiative*/Inisiatif Pelaporan Global (GRI). Kategori kinerja lingkungan ini mencakup sumber daya—bahan, energi, dan air—konsumsi, emisi, dan limbah. Sebaliknya, kategori kinerja sosial adalah praktik ketenagakerjaan dan

pekerjaan yang layak, serta hak asasi manusia dan masyarakat. Akhirnya, kategori kinerja keberlanjutan ekonomi didasarkan pada biaya, kualitas, fleksibilitas, produktivitas, pendapatan, dan profitabilitas.

Ada beberapa investigasi yang berusaha mempelajari dampak positif dan negatif dari Industri 4.0 pada kinerja keberlanjutan (Baidkk., 2020). Hal ini termasuk dalam potensi penghematan dalam konsumsi sumber daya (yaitu material, energi, air dan limbah) dan pengelolaan limbah. Studi lain menemukan peningkatan dalam pekerjaan. Ada juga penelitian yang mengaitkan kemungkinan konsekuensi negatif bagi lingkungan dan sosial dari penerapan teknologi Industri 4.0.

Banyak penelitian menyoroiti peluang Industri 4.0 untuk perbaikan konsumsi sumber daya dari optimalisasi dan kontrol produksi *real-time*. Teknologi Industri 4.0 dapat memfasilitasi perencanaan yang efisien dan menghindari produksi berlebih serta mengurangi bahan yang digunakan melalui proses produksi yang lebih baik. Dengan demikian, industri menetapkan harapan yang tinggi untuk Industri 4.0 sebagai peluang untuk mendapatkan penghematan dan meningkatkan efisiensi bahan baku. Studi yang ditinjau mengonfirmasi, misalnya bahwa IoT diharapkan dapat meningkatkan efisiensi material (Beier dkk., 2018). Namun, mereka tidak menyoroiti bagaimana efisiensi ini dapat ditingkatkan. Dapat diasumsikan bahwa kemampuan IoT untuk memantau seluruh jaringan dan berintegrasi secara *real-time* dengan pemasok dan pelanggan adalah dengan membantu mengelola sumber daya di sepanjang rantai pasok dan meningkatkan efisiensi. Sebagai contoh, kita dapat memikirkan koordinasi bahan yang lebih baik dalam proses pembelian atau pengurangan produksi berlebih melalui ketersediaan informasi pelanggan yang tepat waktu.

Manufaktur aditif menjanjikan manfaat yang ramah lingkungan. Penghematan penggunaan material terjadi karena perpanjangan siklus hidup produk yang dihasilkan dari desain produk dan daur ulang limbah menjadi produk baru. IoT dan *big data* membantu pemanfaatan informasi produk yang relevan di seluruh siklus hidup. Elemen digital dalam suatu produk dapat dengan mudah diganti—seperti

melalui peningkatan perangkat lunak. Pembaruan ini mengurangi konsumsi material dan memfasilitasi daur ulang material. Namun, berkaitan dengan konsumsi bahan baku, industri 4.0 mungkin tidak memiliki dampak besar pada kinerja lingkungan secara keseluruhan dari produknya. Dalam konteks ini, komputasi awan secara positif terkait dengan pengurangan konsumsi bahan beracun. Dukungan *real-time* berbasis data dapat meningkatkan penggunaan bahan ramah lingkungan.

Teknologi Industri 4.0 memang mendukung pengumpulan dan analisis informasi yang berguna tentang konsumsi energi, misalnya memungkinkan pengelolaan konsumsi energi di bidang manufaktur dengan lebih baik. CPS, *big data*, dan pembelajaran cerdas, misalnya dapat diterapkan untuk pengoptimalan dan penjadwalan permesinan hemat energi dalam produksi. CPS dan *big data* juga dapat membantu dalam mengubah parameter sistem secara sistematis (seperti kecepatan pompa) untuk mengontrol konsumsi energi dengan lebih baik.

Secara keseluruhan, proses yang dioptimalkan melalui data besar dan AI dapat menghasilkan penghematan energi yang signifikan serta berkontribusi pada kelestarian lingkungan. Selanjutnya, kemampuan interkoneksi IoT diharapkan dapat meningkatkan efisiensi energi. Manufaktur aditif dapat mengurangi konsumsi energi melalui pengurangan transportasi fisik dan proses logistik (Bonilla dkk., 2018). Integrasi digitalisasi—data besar dan analitik, IoT, dan CPS—dapat menyebabkan peningkatan pangsa energi terbarukan yang digunakan untuk memenuhi konsumsi energi. Sumber energi terbarukan yang lebih besar ini mungkin disebabkan oleh penghematan biaya atau peningkatan ketertelusuran sumber energi dalam siklus hidup. Demikian pula, AI dapat mendukung integrasi sumber energi terbarukan.

Penelusuran data dan pemantauan produk dapat mendukung daur ulang, penggunaan kembali, pengurangan sumber daya yang digunakan, dan mengurangi produksi limbah secara keseluruhan dari suatu produk. Manufaktur aditif berdampak positif pada jumlah limbah yang dihasilkan. Dalam konteks ini komputasi awan juga berhubungan positif dengan pengurangan limbah padat. Komputasi awan

dapat meningkatkan akses dan kolaborasi informasi sesuai permintaan yang dapat mengurangi pemborosan dengan pemahaman yang lebih baik tentang pasar konsumen. Teknologi IoT juga diusulkan untuk memantau jumlah keseluruhan limbah, misalnya, dalam rantai pasok pangan (Jagtap dkk., 2019). Dengan cara lain, analitik *big data* dapat mengurangi pemborosan dan memperoleh efisiensi lini produksi yang lebih tinggi melalui peramalan dan analisis dalam lini produksi.

Teknologi ini juga dapat memiliki konsekuensi lingkungan yang negatif. Fase penyebaran terutama terkait dengan peningkatan konsumsi sumber daya. Produksi perangkat elektronik untuk CPS, produk pintar, dan robot meningkatkan permintaan peralatan dan perangkat. Oleh karena itu, bahan-bahan mentah yang langka, penggunaan energi, dan produksi limbah menjadi meningkat. Operasi di lingkungan ini menggunakan atau menghasilkan data yang signifikan. Pusat *big data* yang mengumpulkan dan menganalisis kondisi ini sangat diperlukan. Upaya komputasi keseluruhan menyebabkan permintaan energi cenderung meningkat untuk situasi manajemen *big data* ini. Teknologi Industri 4.0 lainnya, seperti AI atau manufaktur aditif kemungkinan akan meningkatkan konsumsi energi, jika dibandingkan proses manufaktur tradisional.

Di sisi lain, keberlanjutan sosial melihat perubahan dalam praktik ketenagakerjaan dan pekerjaan yang layak. Ketenagakerjaan (jumlah pekerjaan), kondisi kerja dan upah, serta kesehatan dan keselamatan kerja menjadi faktor penting dalam hal keberlanjutan sosial. Sementara itu, pekerjaan keterampilan rendah cenderung digantikan oleh otomatisasi.

Terdapat tiga tren utama diharapkan. Pertama, aktivitas rutin manual dengan tingkat stres manusia yang tinggi, akan berkurang. Proses otomatis cenderung menggantikan tugas-tugas sederhana dan memengaruhi pekerjaan serta kondisi kerja karyawan yang kurang terampil. Kedua, pekerja yang lebih terampil akan dipekerjakan untuk mengelola proses otomatis. Ketiga, tugas baru akan muncul untuk pekerja berketerampilan rendah dari sistem bantuan cerdas. Di bidang ketenagakerjaan, kemungkinan lebih banyak pekerjaan

diciptakan dalam penelitian dan pengembangan, sedangkan dalam bidang produksi dan perakitan akan lebih sedikit.

Proses yang disederhanakan—terkait dengan IoT dan otomatisasi—memberikan manfaat dalam kondisi kerja, yaitu mengurangi stres psikologis dan meningkatkan kesejahteraan pekerja. Selain itu, implementasi Industri 4.0 dapat memberikan otonomi yang lebih besar kepada pekerja dalam melakukan tugas dan meningkatkan interaksi sosial mereka. Melalui penerapan teknologi, seperti *blockchain*, data besar dan IoT, masalah terkait tenaga kerja, termasuk kondisi kerja yang sesuai, upah, dan ekuitas, tindakan perusahaan dapat dilacak untuk mencegah penyalahgunaannya (Venkatesh dkk., 2020). Namun, dalam beberapa kasus, Industri 4.0 juga dapat menyebabkan masalah kesehatan mental atau keseimbangan kerja/hidup yang tidak sehat, misalnya karyawan takut kehilangan pekerjaan (Pasi dkk., 2020).

Di sisi lain, integrasi teknologi Industri 4.0 (khususnya *blockchain*, IoT, dan analitik *big data*) dapat berdampak positif pada kesehatan dan keselamatan di tempat kerja karena peningkatan keterlacakan dalam rantai pasok. Selain itu, penerapan teknologi tersebut dapat menggantikan pekerjaan manual yang berat, mengurangi risiko cedera, serta meningkatkan kesehatan dan keselamatan kerja, misalnya kolaborasi robot-manusia dapat mendukung ergonomis pekerja (Gualtieri dkk., 2020). Teknologi Industri 4.0 lainnya yang dapat berkontribusi dalam peningkatan keselamatan kerja adalah *augmented reality* (AR). AR dapat memberikan informasi tambahan kepada pekerja—seperti area berbahaya atau tindakan berbahaya—untuk meningkatkan keselamatan kerja. Singkatnya, akan ada beberapa perubahan dalam kondisi kerja dan pekerjaan, namun tidak jelas apakah ini akan menjadi perubahan positif atau negatif dan bagaimana konsep teoretis teknologi individu dapat diukur dan diterapkan.

Terdapat hubungan antara Industri 4.0—khususnya komputasi awan—dan kekhawatiran tentang hak asasi manusia dan masyarakat. Teknologi akan meningkatkan masalah etika, privasi, dan masalah otonomi pribadi. *Big data* dapat menimbulkan masalah etika, terutama dalam definisi algoritma AI (pembelajaran mesin). Kekhawatiran digi-

alisasi membutuhkan redefinisi etika dan norma manusia. Hilangnya privasi dan hilangnya otonomi pribadi—membuat pilihan otonom dan tidak tunduk pada pembatasan sewenang-wenang— adalah potensi hasil data besar dan *cloud* (Sugiyama dkk., 2017).

Subjek kontroversial lainnya adalah AI yang dalam masyarakat berpotensi memberi manfaat, misalnya, teknologi ini dapat mendukung nondiskriminasi dan meningkatkan kesehatan, dan serta keselamatan masyarakat. Namun, mereka juga dapat menghambat pencapaian keberlanjutan sosial; algoritma yang tidak dilatih secara kritis sebenarnya dapat meningkatkan diskriminasi.

Di beberapa area—seperti transportasi umum—perkembangan Industri 4.0 berhubungan positif dengan dampak kesehatan dan keselamatan masyarakat (Davidsson dkk., 2016). Hal ini juga dapat menyebabkan peningkatan aksesibilitas transportasi umum yang meningkatkan kesetaraan sosial. Aksesibilitas memungkinkan beberapa kelompok sosial, seperti orang tua atau disabilitas untuk meningkatkan partisipasi mereka dalam kehidupan sosial; dalam artian inklusi sosial meningkat.

Dalam bidang lain, terdapat efek potensial dari teknologi Industri 4.0 pada kinerja ekonomi dan bisnis perusahaan. Meskipun adopsi teknologi Industri 4.0 menimbulkan risiko ekonomi yang tidak pasti dan profitabilitas memerlukan evaluasi yang cermat, Industri 4.0 diharapkan dapat meningkatkan profitabilitas ekonomi perusahaan melalui penggunaan sumber daya dan proses yang lebih efisien. Teknologi produksi fisik siber dapat meningkatkan efisiensi berbagai aktivitas, seperti pemilihan bahan, penggunaan kembali, daur ulang bahan, dan manajemen energi dengan pemantauan konsumsi energi secara *real-time*.

IoT memungkinkan pertukaran informasi *real-time* di dalam dan seluruh perusahaan untuk terus memantau proses fisik yang dapat berdampak signifikan terhadap produktivitas (Nagy dkk., 2018). Demikian pula dengan teknologi lain, seperti CPS, dapat diterapkan untuk meningkatkan produktivitas, misalnya melalui kolaborasi manusia-robot.

Beberapa penelitian merujuk pada pengurangan biaya dari Industri 4.0 terkait dengan peningkatan manajemen siklus hidup produk. Teknologi virtual, seperti *digital twin* mengintegrasikan berbagai bentuk informasi ke dalam sistem *cloud*—seperti informasi layanan terkait pengguna, produk, dan logistik—yang dapat membantu memetakan proses fisik dan mendapatkan umpan balik siklus tertutup. Informasi ini tidak hanya dapat meningkatkan pengalaman pelanggan terkait produk dan layanan, tetapi juga mengurangi pemborosan sumber daya dan mengurangi biaya. Biaya juga dapat ditekan melalui optimalisasi produksi dan penghematan sumber daya yang dihasilkan, misalnya komputasi awan dapat mengurangi penggunaan energi dan biaya operasi. Data *real-time* dapat meningkatkan pengambilan keputusan dan teknologi pelacakan, seperti RFID dapat memfasilitasi logistik dan mengurangi biaya rantai pasok.

Selain potensi keuntungan efisiensi biaya, teknologi Industri 4.0 dapat berdampak positif pada efisiensi waktu serta fleksibilitas dan kualitas produksi. Misalnya teknik manufaktur aditif memengaruhi pemeliharaan dan logistik sambil berkontribusi pada fleksibilitas yang diperlukan untuk produk yang disesuaikan berdasarkan permintaan. Demikian pula, IoT menawarkan peningkatan kustomisasi produk. Dengan mengadopsi strategi *make-to-order*, teknologi Industri 4.0, seperti IoT atau manufaktur aditif dapat membantu meningkatkan aliran pendapatan, yaitu ketika produk dibeli oleh pelanggan sebelum diproduksi (Ford & Despeisse, 2016).

Beberapa studi lain menyelidiki hubungan sebaliknya, yaitu keberlanjutan sebagai anteseden untuk adopsi Industri 4.0. Tekanan keberlanjutan merupakan tantangan besar bagi produsen. Elemen pabrik masa depan, seperti produksi *cloud* dapat mengatasi tantangan ini. Investigasi awal telah menunjukkan keberlanjutan sebagai pendorong implementasi Industri 4.0. Manfaat operasional, sosial, dan lingkungan yang terkait dengan Industri 4.0 bertindak sebagai anteseden untuk adopsi Industri 4.0 di beberapa perusahaan. Sebagai alternatif, telah ditemukan bahwa tekanan lingkungan tidak dianggap

sebagai salah satu motivasi utama untuk adopsi *big data* di perusahaan. Para ahli telah menemukan bahwa perusahaan terkadang tidak menyadari manfaat lingkungan dari Industri 4.0 (Brozzi dkk., 2020). Tampaknya, dalam beberapa kasus hubungan antara tujuan hijau lingkungan dan teknologi Industri 4.0 tidak dianggap kuat (Chiarini dkk., 2020). Bahkan, dengan hasil campuran yang sangat awal, sulit untuk menyimpulkan apakah keberlanjutan merupakan anteseden yang kuat untuk adopsi Industri 4.0.

F. Fungsi Keberlanjutan Industri 4.0

Optimalisasi manfaat keberlanjutan dari Industri 4.0 memiliki dampak pada berbagai bidang, mulai dari aspek ekonomi, sosial, hingga lingkungan. Selain pertumbuhan ekonomi secara umum, manfaat ekonomi dapat dirasakan oleh industri melalui inovasi bisnis, proses produksi, hingga berdampak pada profitabilitas perusahaan. Masyarakat juga diharapkan bisa mendapat keuntungan melalui terciptanya lapangan kerja dan peningkatan kesejahteraan. Sementara itu, kelestarian lingkungan dapat didukung karena penerapan teknologi ini memiliki potensi untuk mengurangi emisi karbon, keberlanjutan energi, dan tanggung jawab lingkungan yang semakin baik. Secara lebih rinci, fungsi keberlanjutan tersebut dijelaskan sebagai berikut.

1. Kebaruan dan Inovasi Model Bisnis

Prinsip-prinsip desain Industri 4.0, seperti interoperabilitas, desentralisasi, dan kemampuan *real-time* telah secara drastis mengubah cara bisnis merancang dan memberikan produk serta layanan baru mereka. Munculnya Industri 4.0 telah dikaitkan dengan pengenalan dan penerapan secara luas inovasi model bisnis baru, seperti *Crowd-Sourced Innovation* (CSI), *Manufacturing as a Service* (MaaS), dan *Product as a Service* (PaaS), mungkin menawarkan peluang keberlanjutan ekonomi dan sosial yang signifikan.

2. Pengurangan Emisi Karbon

Emisi industri adalah penyebab lebih dari 40% emisi gas rumah kaca di seluruh dunia (EPA, 2019). Para ahli percaya bahwa digitalisasi manufaktur dan munculnya revolusi industri keempat menawarkan banyak peluang untuk pengurangan emisi karbon (Kamble dkk., 2018). Produksi berbasis *Industrial Internet of Things* (IIoT) dan AI, misalnya meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas produksi, mengurangi pemborosan, dan meminimalkan indeks emisi karbon per produk. Peluang yang ditawarkan oleh Industri 4.0 untuk pengembangan model bisnis baru, seperti pergeseran dari produksi massal ke kustomisasi massal, bahkan individualisasi produk, dapat mengoptimalkan pasar konsumen dan berkontribusi pada terwujudnya masa depan rendah karbon, lebih lanjut berkontribusi pada kelestarian lingkungan dan sosial.

3. Peningkatan Profitabilitas Korporasi

Implikasi profitabilitas perusahaan dari Industri 4.0 telah diakui secara luas. Laporan industri menunjukkan bahwa penerapan tren teknologi Industri 4.0, seperti IIoT, manufaktur aditif, layanan *cloud*, dan analitik data, serta pengembangan prinsip desain Industri 4.0, seperti manufaktur cerdas dan personalisasi produk telah dikaitkan dengan berbagai peluang keberlanjutan ekonomi. Beberapa peluang tersebut di antaranya sebagai optimalisasi aliran material, waktu pemasaran produk yang lebih baik, optimalisasi ruang produksi dan fasilitas, efisiensi sumber daya, pengurangan limbah, inovasi dan kualitas produk yang unggul. Peluang keberlanjutan ekonomi ini tentunya dapat meningkatkan kapasitas dan keandalan produksi, kemampuan beradaptasi strategis, dan menurunkan biaya persediaan.

4. Pertumbuhan Ekonomi

Para ahli percaya, ketika tren teknologi dan prinsip desain Industri 4.0 diadopsi di seluruh ekosistem bisnis, digitalisasi dapat berkontribusi besar terhadap pembangunan ekonomi berkelanjutan suatu negara (Lopes de Sousa Jabbour dkk., 2018). Industri 4.0 diharapkan dapat

berperan sebagai pencipta lapangan kerja, bukan sebagai penghapus pekerjaan. Meskipun Industri 4.0 menghapus banyak pekerjaan berketerampilan rendah, juga dibarengi penciptaan peluang kerja dengan digitalisasi yang tak terhitung jumlahnya. Industri 4.0 akan memungkinkan negara-negara, khususnya negara-negara berkembang, untuk melompati pembangunan industri mereka yang belum tercapai dan mempercepat modernisasi ekonomi (Ghobakhloo, 2020). Selain itu, keberlanjutan manajemen operasi yang dihasilkan dari adopsi teknologi digital Industri 4.0, berkontribusi positif terhadap perkembangan ekonomi sirkular. Implikasi Industri 4.0 yang melampaui rantai pasok atau batas produksi dan melibatkan saluran distribusi dan pasar konsumen, menyebabkan penyebaran teknologi Industri 4.0 akan memiliki peluang berharga bagi berbagai dimensi dalam pembangunan ekonomi berkelanjutan.

5. Keberlanjutan Energi dan Sumber Daya

Transformasi digital yang diprakarsai oleh Industri 4.0 mendukung kelestarian lingkungan melalui transformasi energi dan sumber daya yang berkelanjutan. Industri 4.0 secara historis mengubah cara masyarakat memproduksi, berdagang, mengonsumsi, dan hidup. Digitalisasi sistem energi dan penerapan TIDO secara luas, seperti jaringan nirkabel atau teknologi *blockchain* telah menawarkan peluang berharga untuk memajukan sektor energi (Huang dkk., 2017).

Jaringan pintar yang memfasilitasi integrasi jaringan listrik dan sumber energi terbarukan adalah contoh implikasi digitalisasi yang diakui secara luas dalam literatur (Faheem dkk., 2018). Implikasi keberlanjutan Industri 4.0 tidak terbatas pada keberlanjutan energi. Sistem produksi yang lebih efisien dan munculnya teknologi manufaktur digital canggih (seperti CPPS, manufaktur aditif, dan robotika cerdas), sistem perencanaan, dan alokasi material yang cerdas, telah berkontribusi pada efisiensi dan penghematan material, secara signifikan membuka jalan bagi keberlanjutan ekonomi. Waktu adalah sumber daya yang tak ternilai dalam ekonomi manufaktur, dan desentralisasi, integrasi horizontal/vertikal, interoperabilitas, dan

kemampuan *real-time* Industri 4.0 memiliki banyak implikasi efisiensi waktu, misalnya dalam hal waktu siklus manufaktur atau efisiensi *lead time* pengadaan.

6. Perbaikan Tanggung Jawab Lingkungan

Industri 4.0 dan digitalisasi sektor manufaktur menawarkan implikasi mendalam bagi keberlanjutan sosial-ekonomi berkat pengembangan praktik ramah lingkungan yang reaktif dan proaktif (Kamble dkk., 2018). Teknologi manufaktur aditif, AVR, dan *High-Performance Computing-powered Computer-Aided Design and Manufacturing* (HPC-CADM), misalnya memfasilitasi pengembangan produk ramah lingkungan baru (Ford & Despeisse, 2016). Praktik manajemen lingkungan, seperti penilaian siklus hidup, *Eco Balance*, atau tolok ukur kinerja lingkungan sangat memerlukan informasi yang sangat intensif. Sementara itu, integrasi data dan informasi serta kemampuan manajemen IIoT, IoS, dan data besar *cloud* memfasilitasi nilai-jaringan secara luas dalam pengembangan kemampuan pengelolaan lingkungan.

Dilihat dari kacamata keberlanjutan ekonomi, transisi digital akan memungkinkan bisnis untuk menangkap intelijen pasar dan lebih memahami serta menyerap peluang keberlanjutan lingkungan. Lebih penting lagi, dampak produktivitas Industri 4.0 yang dimungkinkan oleh manajemen produksi kolaboratif, kemampuan manajemen pengetahuan di seluruh rantai pasok, fleksibilitas produksi, dan modularitas desain menawarkan berbagai peluang keberlanjutan lingkungan dalam hal pengurangan limbah dan efisiensi material.

7. Pengembangan Sumber Daya Manusia

Industri 4.0 dan transformasi digital secara fundamental membentuk kembali cara kerja sumber daya manusia. Para ahli percaya bahwa penyederhanaan dan otomatisasi proses, dan peningkatan pengambilan keputusan yang dihasilkan, dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi sumber daya manusia (Sivathanu & Pillai, 2018). AI dan alat analisis data, misalnya dapat memungkinkan manajer untuk mengekstrak pola yang bermakna dari data karyawan dan menawarkan skema

pengembangan karier yang dipersonalisasi atau program pembelajaran berdasarkan perilaku, pengalaman, keterampilan, kepribadian, dan pola pembelajaran setiap karyawan.

Penggunaan *Internet of People* (IoP) dalam konteks perusahaan, yang biasa disebut sebagai intranet sosial, memungkinkan karyawan dan manajer untuk lebih bebas dalam berinteraksi satu sama lain, mengurangi kesenjangan komunikasi antara kepemimpinan, manajemen menengah, dan karyawan (Corral de Zubielqui dkk., 2019). Lebih penting lagi, teknologi visual dan simulasi, seperti AVR menawarkan salah satu cara paling efektif untuk pelatihan industri. Secara keseluruhan, AVR menawarkan pengalaman belajar yang lebih terjangkau, lebih aman, lebih cepat, dan produktif. Misalnya personel pemeliharaan dapat dengan aman mempraktikkan perbaikan yang berbahaya atau sensitif dan meningkatkan kesiapan mereka sebelum melakukan perbaikan. Organisasi juga dapat menerapkan AI dan analitik prediksi untuk meneliti sejarah posisi pekerjaan tertentu dan mengidentifikasi kandidat yang memiliki kompetensi yang dibutuhkan di antara kumpulan talenta yang ada. Inisiatif pengembangan sumber daya manusia yang diaktifkan secara digital, pada gilirannya, menawarkan banyak peluang keberlanjutan sosial ekonomi, seperti produktivitas karyawan dan efisiensi perusahaan secara keseluruhan.

8. Meningkatkan Produktivitas dan Efisiensi Produksi

Digitalisasi manufaktur dalam Industri 4.0 memungkinkan produsen untuk mengembangkan dan menerapkan ekosistem manufaktur *lean-agile hybrid* untuk mendukung filosofi personalisasi produk (Ghobakhloo, 2020). Kemampuan manufaktur asinkron dari sistem manufaktur *lean-agile*, pada gilirannya, memungkinkan fasilitas produksi berkemampuan produksi massal secara menguntungkan memenuhi permintaan konsumen yang selalu berubah, bahkan melalui produksi *lot* kecil atau bahkan produksi tunggal. Atau, otomatisasi, interoperabilitas, dan kecerdasan *Cyber-Physical Production Systems* (CPPS) berkontribusi pada efisiensi dan produktivitas produksi

dengan meningkatkan langkah-langkah kontrol proses, memfasilitasi pemeliharaan *real-time*, memantau kinerja mesin secara *real-time*, meningkatkan efisiensi penjadwalan, dan mengurangi waktu henti mesin. Lebih penting lagi, automasi industri mengurangi intervensi manusia yang mengarah pada kesalahan manusia yang lebih rendah, pengurangan risiko, dan masalah keamanan.

9. Menciptakan Lapangan Kerja

Laporan industri menunjukkan bahwa Industri 4.0 memiliki dampak signifikan pada industri rekrutmen (Brougham & Haar, 2018). Di lingkungan Industri 4.0, robot industri, kendaraan otomatis, dan mesin cerdas menggantikan manusia dalam berbagai aktivitas, seperti pelacakan inventaris, kontrol kualitas, dan bahkan distribusi produk. Para ahli mengharapkan, Industri 4.0 menghilangkan sebagian besar pekerjaan berketerampilan rendah hingga menengah, tetapi mengimbangi hilangnya pekerjaan terkait otomatisasi dengan menciptakan banyak peluang kerja baru di bidang informatika, mekatronik, rekayasa proses, dan integrasi sistem (Ghobakhloo, 2020). Implikasi keberlanjutan sosial dari Industri 4.0 tidak hanya terbatas pada penciptaan lapangan kerja terkait digitalisasi. Industri 4.0 dan digitalisasi industri manufaktur berkontribusi pada ekonomi yang lebih hijau dan berkelanjutan yang mengarah pada penciptaan jutaan peluang kerja terkait manufaktur yang berkelanjutan.

10. Mengurangi Biaya Produksi

Produksi *non-stop* 24/7 yang otonom, peningkatan pengendalian proses, peningkatan presisi dan kualitas manufaktur, pemantauan *real-time*, dan pencegahan kecelakaan, efisiensi pemeliharaan, efektivitas peralatan yang lebih tinggi, kesalahan manusia yang lebih rendah, pengambilan keputusan yang berkualitas, proses pengadaan yang efisien, pengurangan biaya sumber daya manusia, dan efisiensi bahan/sumber daya/energi adalah contoh implikasi Industri 4.0 untuk pengurangan biaya produksi.

11. Fleksibilitas Manufaktur

Produsen saat ini menghadapi ketidakpastian permintaan, tuntutan individualisasi produk, serta berkurangnya umur produk dan teknologi manufaktur. Dalam keadaan seperti itu, Industri 4.0 berkontribusi pada keberlanjutan perusahaan dengan memungkinkan produsen mengembangkan sistem manufaktur yang lebih gesit dan fleksibel. *Enterprise Resource Planning* (ERP) cerdas *Nextgen*, simulasi industri, *digital twin*, dan analitik data besar memungkinkan bisnis menangani ketidakpastian lingkungan secara efisien, dan mengelola proses perubahan mikro atau mengubah model bisnis mereka yang ada di lingkungan bisnis yang bergejolak secara ekonomis dan sesegera mungkin (Yin dkk., 2018). Atau, integrasi vertikal, kemampuan *real-time*, dan fitur interoperabilitas Industri 4.0 memungkinkan produsen untuk mengurangi biaya produksi dan keputusan penyesuaian proses produksi.

Lebih penting lagi, keintiman virtual yang diaktifkan secara digital dan koneksi berbasis *cloud* di seluruh rantai nilai, jalur produksi yang cerdas, dan desentralisasi dalam konteks Industri 4.0, akan menciptakan ekosistem manufaktur gesit yang memungkinkan reaksi cepat dan kapasitas adaptasi dalam menanggapi perubahan dan ketidakpastian lingkungan.

12. Modularitas Produksi

Industri 4.0 dan teknologi digital cerdas yang mendasarinya dapat mendukung keberlanjutan dengan memungkinkan produsen merangkul pendekatan modular untuk desain produk, teknik, manufaktur, dan pengiriman. AVR dan HPC-CADM, ditambah dengan kolaborasi *Virtual Product Development* (VPD) virtual yang diaktifkan secara digital di seluruh jaringan pasokan, akan secara signifikan meningkatkan modularitas desain produk. Desain produk modular, pada gilirannya, menawarkan keuntungan, seperti waktu pemasaran yang lebih singkat, mengurangi kompleksitas dan biaya produksi, kualitas produk yang lebih tinggi, masa pakai produk lebih lama, serta efisiensi bahan dan sumber daya.

Kehadiran IIoT, CPPS, dan fitur interoperabilitas yang menguntungkan akan memungkinkan modularisasi fisik peralatan produksi, fasilitas, atau bahkan seluruh jaringan produksi, kepada kondisi yang memungkinkan fasilitas produksi dengan mudah dikonversi dan digunakan untuk produk atau proses alternatif tanpa rekayasa ulang yang tinggi atau biaya reotomatisasi. Produktivitas yang lebih tinggi, stabilitas proses yang lebih baik, kemampuan penyesuaian produk, pengurangan pemborosan, dan waktu tunggu adalah beberapa di antara peluang keberlanjutan lain yang dihasilkan oleh modularisasi.

13. Personalisasi Produk

Industri 4.0 menawarkan peluang baru untuk personalisasi produk. Produsen saat ini dapat mengembangkan strategi personalisasi produksi, yang merupakan bentuk terbaru dari strategi diferensiasi, dan tetap kompetitif di era digitalisasi. Munculnya kemampuan IoS, IoP, dan *data mining* telah memungkinkan produsen untuk berkomunikasi dan berinteraksi dengan pelanggan secara langsung serta mengumpulkan dan menganalisis volume data yang sangat besar tentang preferensi pelanggan, dan kebiasaan konsumsi. Aksesibilitas manufaktur aditif baru-baru ini, ditambah dengan fitur modularitas produksi pabrik pintar, memungkinkan produsen memproduksi Produk Ultra-Personalisasi (PUP) berdasarkan preferensi konsumen dan ide-ide baru. Berkat munculnya sistem produksi massal yang dapat dikonfigurasi ulang, pelanggan dapat menerima PUP dengan harga yang jauh lebih terjangkau, dan produsen dapat memperoleh nilai lebih dari setiap unit produk. Di tingkat pabrik, penerapan model *digital twin* dan perencanaan produksi berbasis AI, berkontribusi pada sinkronisasi optimal praktik manufaktur dan operasi pada berbagai PUP yang diproduksi secara bersamaan.

14. Manajemen Risiko dan Keselamatan

Manajemen risiko dan implikasi Industri 4.0 sangat beragam. Penerapan IIoT, teknologi semantik, *data cloud*, analitik canggih, penghapusan silo informasi yang dihasilkan dan aliran informasi yang

disederhanakan tentang tingkat inventaris, kondisi mesin, kapasitas pabrik, rute transportasi, dan jadwal pengadaan, pada akhirnya akan mengarah pada peningkatan yang lebih besar. Visibilitas *End to End* (E2E) berbasis data, pada gilirannya, mengarah pada pengurangan risiko manufaktur dan peningkatan stabilitas. Oleh karena itu, Industri 4.0 memungkinkan produsen untuk mengidentifikasi potensi bahaya secara *real-time* dan menindaklanjutinya sebelum menjadi risiko nyata.

Secara khusus, alat, seperti kamera cerdas, sensor cerdas, perangkat keselamatan pintar, dan sistem kesadaran lokasi berbasis AI dapat mendeteksi dan melaporkan perilaku manusia atau mesin apa pun yang mungkin menimbulkan risiko terhadap keselamatan (Kamble dkk., 2018). Selain itu, banyak teknologi terkait Industri 4.0 saat ini memiliki langkah-langkah keamanan bawaan yang canggih, seperti SAFETY terbuka untuk pengoperasian mesin produksi yang aman dan andal.

Teknologi yang kompatibel dengan Industri 4.0 untuk manajemen pemeliharaan, memungkinkan pemecahan masalah aset *real-time* dan otonom yang mengurangi masalah keselamatan lingkungan produksi secara signifikan. Industri 4.0 juga telah dikaitkan dengan aplikasi Robot Kolaboratif (*cobot/collaborative robot*) yang lebih aman dan lebih cerdas di pabrik-pabrik pintar (Kim dkk., 2019). Berkat kemajuan dalam AI, analisis data, dan pembelajaran mesin, cobot yang lebih cerdas saat ini menawarkan kemampuan identifikasi bahaya dan penilaian risiko yang lebih baik. Cobot pintar menafsirkan dunia di sekitar mereka dengan lebih baik, melibatkan pengurangan risiko operasi, dan menjaga rekan kerja manusia dengan lebih aman.

15. Peningkatan Kesejahteraan Sosial

Selama beberapa dekade terakhir, kemajuan dan difusi teknologi baru belum memberikan banyak peluang untuk kesetaraan sosial-ekonomi. Laporan dan survei ekonomi yang ada, mengungkapkan bahwa kemajuan teknologi agak terkait dengan ketidaksetaraan ekonomi. Hal ini terlihat dari teknologi baru yang menawarkan lebih banyak kekayaan

dan standar hidup kepada mereka yang lebih beruntung, sedangkan yang lain tertinggal lebih drastis. Industri 4.0 dan paradigma baru manufaktur digital, bagaimanapun, dapat menawarkan peluang berharga untuk depolarisasi pendapatan dan kekayaan.

Kesempatan kerja yang tak terhitung jumlahnya dan kenaikan upah minimum karena padatnya keterampilan pekerjaan baru dalam konteks Industri 4.0, idealnya dapat secara positif mengatasi masalah ketimpangan ekonomi. Berkat prinsip desain personalisasi produk Industri 4.0, konsumen paling biasa pun dapat menyesuaikan sebagian atau seluruh pesanan mereka tanpa membayar harga premium. Model pemasaran dan distribusi baru, bahan, sumber daya, dan efisiensi produksi yang ditawarkan oleh manufaktur digital cerdas diharapkan dapat meningkatkan aksesibilitas global dan keterjangkauan barang dan jasa. Inovasi model bisnis dalam konteks Industri 4.0, model PaaS, khususnya, membentuk kembali konsep kepemilikan dengan memperbaiki keterjangkauan barang pada saat dibutuhkan.

16. Integrasi dan Digitalisasi Rantai Pasok

Fungsi Industri 4.0 dalam rantai pasok akan banyak dibahas di bab selanjutnya. Secara umum, dalam hal ini, difusi inovasi teknologi, seperti IIoT, komputasi awan, *Blockchain*, dan analitik canggih mengubah rantai pasok tradisional menjadi *digital supply network* (DSN). DSN mencakup tiga lapisan fungsional yang berbeda. Pada lapisan fisik-digital, sinyal dikumpulkan melalui sensor cerdas, visi mesin, dan aktuator pada seluruh jaringan nilai. Mesin dan pengontrol proses, seperti pengontrol logika yang dapat diprogram atau kontrol pengawasan dan akuisisi data, mengubah sinyal yang ditangkap dari dunia fisik menjadi catatan digital yang berarti. Pada lapisan digital, AI dan alat analisis bisnis yang tertanam pada sebagian besar solusi *Enterprise Resource Planning* (ERP) modern, mendorong wawasan yang berarti dari catatan digital. Pada lapisan fisik-digital, keputusan berbasis AI yang dibuat berdasarkan catatan digital, dijalankan secara mandiri oleh aset fisik di seluruh jaringan pasok secara *real-time* (Ghobakhloo, 2020).

Fitur *real-time*, dinamis, integratif, kecerdasan, terukur, dan kelincuhan DSN menawarkan banyak keuntungan, seperti kesetaraan beban kerja di seluruh rantai pasok, efisiensi operasional yang lebih tinggi, integrasi aliran keuangan, perencanaan dinamis *ad-hoc*, efektivitas pemasaran, perencanaan kolaboratif, dan integrasi pelanggan yang lebih dalam. Lebih penting lagi karena akuisisi dan manajemen data yang lebih baik, integrasi informasi, dan eksekusi proses fisik, DSN dapat secara signifikan mencegah pemborosan digital dan memberikan diferensiasi kompetitif kepada anggota pemasok.

G. Memaksimalkan Potensi Teknologi Industri 4.0

Beberapa komunitas mungkin masih menyangkal betapa besar dan pentingnya Industri 4.0. Organisasi terkemuka telah menerapkan teknologi digital canggih, seperti IIoT, AVR, robotika industri, komputasi awan, AI, dan HPC-CADM dalam mempersiapkan kebangkitan revolusi industri digital. Para akademisi dan industrialis percaya bahwa Industri 4.0 dapat berdampak positif terhadap keberlanjutan dan bab ini berusaha untuk memberikan model interpretatif dari fungsi keberlanjutan Industri 4.0 yang menjelaskan proses sehingga digitalisasi industri dan tren teknologi yang mendasari, serta prinsip-prinsip desain dapat berkontribusi pada pencapaian ekonomi, tujuan pembangunan keberlanjutan lingkungan, dan sosial.

Akademisi percaya bahwa Industri 4.0 dan digitalisasi industri yang mendasarinya dapat menawarkan peluang untuk keberlanjutan, seperti efisiensi sumber daya atau pembangunan ekonomi secara keseluruhan. Meskipun demikian, hal ini masih berupa kontribusi kecil dari Industri 4.0 untuk keberlanjutan. Transformasi digital yang diprakarsai oleh Industri 4.0, pertama-tama harus matang untuk memberikan fungsi keberlanjutan yang diinginkan, dan pengembangan sumber daya manusia untuk digitalisasi adalah batu loncatan untuk proses ini.

Saat ini, kesenjangan keterampilan di semua industri tumbuh pada tingkat yang belum pernah terjadi sebelumnya. Hal ini disebabkan oleh penyebaran bola salju dari teknologi digital canggih, kemajuan pesat dalam AI, dan integrasi IIoT di berbagai industri. Teknologi ini bisa dengan cepat mengubah sifat pekerjaan, menyusutkan peluang kerja berketerampilan rendah, dan semakin menuntut keterampilan teknis di bidang pemecahan masalah, pemrograman, pemikiran kreatif, dan desain sistem. Kabar baiknya adalah dengan teknologi digital yang sama, yang bertanggung jawab atas kesenjangan keterampilan digitalisasi, dapat berkontribusi untuk menjembatani. Penggunaan AVR, aplikasi pintar, berbagi informasi yang diaktifkan IIoT, dan alat analisis data dapat secara signifikan meningkatkan efektivitas pelatihan di tempat kerja, penyaringan dan akuisisi keterampilan, program pembelajaran, dan skema pengembangan karier.

Industri 4.0 lebih lanjut berkontribusi pada keberlanjutan dengan mendigitalkan rantai pasok dan mempromosikan integrasi di seluruh jaringan nilai. DSN, kombinasi dari pemasok cerdas, pelanggan yang terhubung, dan pabrik cerdas yang digabungkan dengan penerapan perencanaan kognitif, manufaktur aditif, pengisian ulang yang digerakkan oleh sensor, dan pengambilan keputusan berbasis AI, mengarah ke modul, fleksibel, gesit, terkontrol, dan ekosistem penciptaan dan penyampaian nilai yang aman. Ekosistem ini selanjutnya memungkinkan model bisnis personalisasi produk dan layanan, yang inovatif dan meminimalkan inefisiensi, pemborosan, dan aktivitas yang tidak bernilai tambah. Transformasi inovatif dari model dan proses bisnis serta efisiensi yang dihasilkan, pada gilirannya menawarkan banyak keuntungan, seperti profitabilitas perusahaan, produk dan layanan yang lebih terjangkau, pengalaman konsumen yang lebih baik, dan nilai seumur hidup pelanggan yang ditingkatkan.

Keberlanjutan ekonomi-manufaktur adalah salah satu hasil keberlanjutan yang dapat ditawarkan oleh Industri 4.0. Fungsi keberlanjutan ekonomi-manufaktur Industri 4.0, ketika berhasil diwujudkan, dapat membuka jalan bagi kontribusi lebih lanjut Industri 4.0 terhadap keberlanjutan lingkungan dan sosial ekonomi. Secara khusus, fungsi

efisiensi manufaktur, penghematan biaya, dan profitabilitas perusahaan dari transformasi digital industri manufaktur, memungkinkan pengembangan manajemen lingkungan dan kemampuan efisiensi energi/sumber daya di seluruh klaster manufaktur dan saluran distribusi, yang pada akhirnya mempromosikan perlindungan lingkungan dan pengurangan emisi. Secara khusus, digitalisasi industri akan mengurangi biaya dan kompleksitas pengurangan limbah dan emisi, efisiensi material, dan keberlanjutan energi di berbagai proses manufaktur.

Digitalisasi juga akan memungkinkan produsen untuk menganalisis perilaku konsumen secara *real-time* dan melakukan penilaian dampak lanjutan dari produk mereka selama dan setelah siklus hidup mereka. Fungsi keberlanjutan sosial-ekonomi adalah peluang keberlanjutan paling jauh yang dapat ditawarkan oleh Industri 4.0. Fungsi pembangunan ekonomi secara keseluruhan dari Industri 4.0 sangat bergantung pada integrasi digital anggota pemasok, inovasi model bisnis, daya saing perusahaan dan keberlanjutan keuangan, produktivitas dan efisiensi manufaktur, efisiensi energi, dan pengembangan keterampilan sumber daya manusia. Pertumbuhan ekonomi yang dihasilkan mengarah pada tuntutan yang lebih substansial di seluruh pasar tenaga kerja, upah yang lebih tinggi, perbaikan tempat kerja dan kondisi kerja, stabilitas sosial, dan kesetaraan ekonomi. Teknologi 4.0 dan manfaatnya bagi keberlanjutan, tidak hanya cukup dibahas dalam aspek konseptual. Industri, masyarakat umum, dan lingkungan akan mendapat dampak positif dari berbagai inovasi tersebut jika mampu diterapkan secara optimal.

Dengan demikian, Bab III akan lebih khusus membahas penerapan teknologi industri 4.0 dalam bidang manajemen rantai pasok pangan, bagaimana teknologi digital mengubah rantai pasok pangan, dan pengenalan model baru rantai pasok pangan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB 3

Penerapan Teknologi Industri 4.0 dalam Rantai Pasok

A. Potensi Industri 4.0 untuk Manajemen Rantai Pasok

Inisiatif “Industri 4.0” diluncurkan oleh Pemerintah Jerman pada tahun 2011 sebagai bagian dari strategi teknologi tinggi untuk mengatasi tantangan baru dan memastikan daya saing masa depan industri manufaktur Jerman (Kagermann dkk., 2013). Perkembangan teknologi baru, terutama pertukaran data *real-time* di seluruh rantai pasok, di antara produk, pelanggan, dan fasilitas produksi yang dimungkinkan oleh *Internet of Things* dan perpaduan dunia maya dan dunia nyata, membentuk inti teknologi dari revolusi industri keempat (4.0). Paling umum, integrasi vertikal dan horizontal teknologi informasi dan komunikasi, bersama dengan rekayasa *end to end* di seluruh siklus hidup produk, dipandang sebagai konsep dasar dan inovasi terpenting melalui Industri 4.0. Interkoneksi digital memungkinkan informasi untuk dibagikan secara *real-time* di dalam dan antar-perusahaan, serta di seluruh jaringan pasokan. Oleh karena itu, Industri 4.0 memung-

kinkan perusahaan untuk mendorong nilai-nilai ekonomi, seperti daya saing, produktivitas, dan terutama pertumbuhan pendapatan.

Pada saat yang sama, kondisi ini mengarah pada perubahan radikal dalam proses, komunikasi, dan hubungan, sedangkan semua aktivitas bisnis, mulai dari pembelian dan produksi, hingga manajemen konsumen juga terpengaruh. Selain itu, program ini juga telah memicu peningkatan kesadaran akan dimensi ekologis, seperti sumber daya alam yang terbatas dan dimensi sosial, seperti ketakutan masyarakat akan kehilangan pekerjaan karena munculnya teknologi baru. Oleh karena itu, Industri 4.0 mengungkapkan banyak keterkaitan dengan konsep *Triple Bottom Line* (TBL). Akibatnya, tidak mengherankan bahwa Industri 4.0 masih mendapatkan perhatian dari perusahaan dan akademisi, sedangkan beberapa negara sedang mengembangkan inisiatif mereka sendiri untuk menetapkan konsep Industri 4.0. Namun, minat terhadap hubungan antara Industri 4.0 dan TBL juga banyak dipengaruhi oleh masyarakat. Hal ini karena orang semakin mengharapkan pergeseran penciptaan nilai dari manfaat ekonomi murni menuju keberlanjutan holistik, termasuk perspektif sosial dan lingkungan. Ekonomi harus berubah untuk memenuhi standar ekonomi, lingkungan, dan sosial secara merata untuk memastikan pembangunan berkelanjutan yang komprehensif, dirangkum dalam pendekatan TBL.

Untuk mencapai sinergi, tiga dimensi TBL yang saling bergantung harus diselaraskan dan, pada gilirannya, penting untuk adopsi teknologi yang efektif. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah konsep ekonomi sirkular, yang terletak di persimpangan TBL dan *Supply Chain Management* (SCM) yang menggabungkan persyaratan ekonomi dan ekologi ke dalam model bisnis baru (Gupta dkk., 2019). Perusahaan memainkan peran penting sebagai kontributor utama limbah, emisi, dan konsumsi energi mereka. Namun, dalam konsep ekonomi sirkular, sejauh ini, aspek sosial kurang dipertimbangkan meskipun peran mereka sama dalam TBL. Terakhir, topik Industri 4.0 dan SCM terbukti menjadi persimpangan lebih lanjut karena Industri 4.0 bertujuan untuk integrasi horizontal dan vertikal di seluruh rantai

nilai. Pabrik yang terhubung dengan cerdas di seluruh rantai pasok, misalnya, adalah komponen kunci dari Industri 4.0 (Beier dkk., 2018). Selain itu, SCM sendiri menunjukkan keterkaitan yang kuat dengan TBL dan konsep ekonomi sirkular karena banyak aspek ekologi dan sosial hanya dapat dipahami di seluruh rantai pasok.

1. Teknologi Pendukung

Desain virtual dan simulasi proses dimungkinkan melalui produk dan proses kembar digital⁶, proses desain produk dan produksi dapat dibuat lebih cepat, dilakukan dengan lebih sedikit sumber daya, dan dioptimalkan dengan lebih mudah. Penciptaan produk dan proses kembar digital yang konsisten di sepanjang rantai pasok, memungkinkan arus balik data dari data yang digunakan ke produksi dan desain di seluruh rantai pasok (Kiel dkk., 2017). Berbagai peluang peningkatan kualitas dengan teknologi Industri 4.0, meliputi proses yang stabil, waktu henti yang lebih sedikit, dan peningkatan kepuasan konsumen melalui penyediaan produk berkualitas tinggi. Dampak positif dari dimensi lingkungan dapat dilihat dari peningkatan kualitas proses yang mengarah ke lebih sedikit produk cacat dan lebih sedikit limbah di seluruh rantai pasok.

Transparansi di seluruh rantai pasok dan data yang tersedia untuk semua pemangku kepentingan dipandang sebagai potensi utama Industri 4.0 dan sering dikaitkan dengan sistem teknologi terapan yang kompleks. Tujuan keseluruhannya adalah konsistensi dan ketertelusuran data di seluruh rantai pasok untuk operasi produksi dan logistik melalui interkoneksi vertikal secara *real-time*. Data besar yang dihasilkan dapat dievaluasi melalui komputasi awan secara *real-time*, memungkinkan pengambilan keputusan yang cepat dan akurat di dalam perusahaan dan di seluruh rantai pasok. Dengan pembentukan *Internet of Things* lintas batas perusahaan, operasi logistik dapat

⁶ Kembar digital pada dasarnya adalah program komputer yang menggunakan data dunia nyata untuk membuat simulasi yang dapat memprediksi kinerja suatu produk atau proses. Program-program ini dapat mengintegrasikan *Internet of Things* (Industri 4.0), kecerdasan buatan, dan analitik perangkat lunak untuk meningkatkan *output*.

diselaraskan dengan proses lebih efektif, dan rantai pasok yang gesit dapat bereaksi terhadap permintaan konsumen dengan cara yang lebih fleksibel.

Analisis data memerlukan ketersediaan data di seluruh fungsi perusahaan yang berbeda dan di seluruh rantai pasok, serta penyimpanan data yang terdesentralisasi sehingga memungkinkan perusahaan untuk melakukan analisis data dan mengungkap potensi peningkatan (Kiel dkk., 2017). Teknologi sensor merupakan dasar dari data yang berkelanjutan dan andal, serta dapat memantau status saat ini dan parameter proses kritis secara mandiri.

Teknologi Interaksi Manusia-Mesin sangat dibutuhkan, bukan hanya dalam lingkungan produksi dan logistik, melainkan juga di SCM, manusia dapat didukung melalui sistem bantuan (Kiel dkk., 2017). Terutama *augmented reality*, yang memungkinkan manusia untuk menggabungkan kekuatan mereka dengan sistem bantuan melalui perpaduan dunia fisik dan virtual. Beberapa penulis telah menekankan bahwa menggunakan sistem bantuan baru, dapat menyebabkan pengurangan stres dan pengurangan tugas monoton atau berbahaya (Gobbo dkk., 2018). Dengan demikian, kesalahan dan cedera dapat dikurangi sembari meningkatkan kualitas secara keseluruhan. Selain itu, sistem bantuan dapat mendukung pembelajaran berkelanjutan di antara karyawan serta kepuasan karyawan, atau mereka dapat mendorong orang untuk bekerja lebih fleksibel, misalnya dari rumah.

2. Kompatibilitas Keberlanjutan, Ekonomi Sirkular, dan Industri 4.0

Banyak proyek penelitian berusaha menghubungkan kinerja tiga pilar keberlanjutan, yaitu lingkungan, sosial, dan keuangan perusahaan. Upaya dilakukan untuk mengidentifikasi kasus-kasus, di mana ketiga dimensi dapat diselaraskan di bawah paradigma *win-win* untuk pembangunan berkelanjutan. Namun, dalam banyak kasus, perspektif ekonomi/keuangan lebih diprioritaskan. Pencarian situasi *win-win* seperti itu menimbulkan masalah serius karena pembangunan berkelanjutan hanya mungkin dilakukan di persimpangan tiga pilar

keberlanjutan. Oleh karena itu, *trade-off* dan konflik pembangunan berkelanjutan diabaikan, yang membatasi keberlanjutan perusahaan pada solusi bebas konflik dengan titik temu terendah.

Selanjutnya, dalam situasi *trade-off*, tidak mungkin untuk mencapai dua atau lebih tujuan yang diinginkan (Hahn dkk., 2010). Hal ini memberikan sedikit insentif bagi perusahaan dan pengambil keputusan untuk mengejar perubahan mendasar dalam praktik bisnis inti untuk pembangunan berkelanjutan (Hahn dkk., 2010). Terutama dalam kasus Industri 4.0, diperlukan transformasi besar-besaran yang dapat menimbulkan banyak konflik. Dengan demikian, fokus eksplisit pada situasi *win-win* tidak akan mungkin terwujud.

Deskripsi potensi Industri 4.0 untuk keberlanjutan di bawah TBL, menyoroti banyak peluang untuk perbaikan di dalam dan di seluruh pilar, baik dalam dimensi lingkungan, sosial, maupun keuangan perusahaan. Dalam konteks ekonomi sirkular dan keberlanjutan, beberapa kesulitan dan hambatan perlu diatasi karena kedua konsep tersebut sama-sama mengejar pembangunan berkelanjutan, walaupun tetap terdapat beberapa perbedaan. Perbedaan ini berkisar antara tujuan, motivasi, prioritas sistem, pelembagaan, dan penerima manfaat, hingga periode dan pengertian tanggung jawab (Geissdoerfer dkk., 2017). Satu perbedaan penting adalah bahwa ekonomi sirkular tampaknya memprioritaskan pelaku ekonomi dan keuntungan finansial mereka, sementara perspektif ekologis kurang diperhatikan. Pengurangan penggunaan sumber daya dan pencemaran lingkungan tampak lebih bersifat sebagai pelengkap (Geissdoerfer dkk., 2017). Lebih jauh lagi, meskipun sirkularitas memiliki pengaruh positif pada aspek keberlanjutan, sebagian besar perspektif sosial diabaikan (Geissdoerfer dkk., 2017). Untuk alasan ini, sub-hubungan antara setiap dimensi harus diidentifikasi untuk menghindari hierarki intrinsik.

3. Potensi Kontradiksi dan Risiko

Potensi dan risiko harus secara hati-hati diseimbangkan satu sama lain. Ini berlaku untuk ekonomi sirkular secara keseluruhan karena masalah krusial berupa penilaian manfaat potensial, seperti emisi

CO₂ yang rendah, pengurangan limbah, atau daur ulang material yang lebih baik terhadap biaya keseluruhan. Hal ini digunakan untuk menghindari penciptaan nilai negatif. Konflik tujuan antara biaya teknologi dan nilai pengembalian serta volume sangat terlihat karena volume dan nilai unit secara konvensional rendah, terutama untuk suku cadang dan komponen mekanis.

Oleh karena itu, untuk banyak komponen dan material, energi dan dampaknya yang diperlukan untuk proses daur ulang, bisa lebih tinggi daripada total dampak lingkungan dari ekstraksi dan produksi dari sumber produksi itu sendiri. Akibatnya, daur ulang bahkan dapat memperburuk emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih pragmatis, di mana efisiensi material dan bentuk pengurangan input lainnya harus memiliki prioritas lebih tinggi daripada ekonomi sirkular. Selain itu, implikasi sosial, seperti kecukupan konsumen atau perubahan perilaku konsumen melalui dematerialisasi harus dipertimbangkan.

Sebuah contoh khusus, teknologi yang sering ditempatkan di bawah istilah Industri 4.0 adalah teknologi manufaktur aditif, yang terdapat *trade-off* antara efisiensi sumber daya dan energi terkait dimensi ekologis TBL. Di satu sisi, manufaktur aditif dengan prinsip lapis demi lapis menguntungkan aspek lingkungan karena menghasilkan lebih sedikit limbah daripada proses manufaktur subtraktif dan mengurangi proses logistik. Di sisi lain, dibandingkan proses manufaktur subtraktif, metode manufaktur aditif menghabiskan lebih banyak energi (Stock dkk., 2018). Selain konsumsi energi tunggal, manufaktur aditif juga membutuhkan produksi padat energi dari bahan. Produksi padat energi ini adalah masalah lain yang akan membutuhkan solusi yang tepat di masa depan.

Pendekatan produksi yang menargetkan potensi ekologis, seperti keseimbangan beban atau energi, memerlukan peningkatan inventaris untuk memungkinkan peningkatan fleksibilitas. Selain itu, penanganan siklus tertutup aliran material melibatkan kompleksitas tinggi dalam desain, produksi, dan logistik. Pada fase desain awal, keputusan tentang desain dan fitur teknis harus dibuat, dan ini memakan waktu

yang cukup lama, di mana investasi harus terbayar. Hal ini termasuk dengan, misalnya, pilihan teknologi yang tepat untuk berbagai produk yang semakin banyak di pasar.

Rantai pasok terbalik untuk proses daur ulang dihadapkan dengan ketidakpastian yang lebih beragam daripada rantai pasok maju untuk proses produksi. Hal ini terjadi karena banyak faktor, seperti ketidakpastian volume, kualitas, nilai, dan waktu pengembalian produk. Ketidakpastian ini memperumit perencanaan, peramalan, dan alokasi kapasitas serta sumber daya untuk menangani dan mengendalikan pengembalian. Desain dapat mencakup *chip* atau sensor yang memberi tahu pengguna tentang komponen dan bahan yang terkandung dalam produk dan bagaimana mereka dapat dibongkar dan didaur ulang pada akhir masa pakai produk. Namun, semakin banyak informasi produk yang harus disediakan oleh produsen dan informasi pemanfaatan yang harus disediakan oleh pembeli karena durasi dan tingkat penggunaan, memiliki dampak yang kuat pada penggunaan kembali atau daur ulang lebih lanjut. Instruksi pembongkaran dan daur ulang di akhir siklus hidup produk, dapat diwujudkan melalui apa yang disebut “paspor produk”.

Penyediaan informasi, pengembalian produk, dan aktivitas lainnya dalam kerangka ekonomi sirkular, membutuhkan kerja sama yang erat antara semua mitra dalam rantai pasok. Namun, karena kurangnya koordinasi melalui fungsi independen dari setiap anggota rantai pasok, berbagai konflik, seperti tujuan, domain, atau konflik persepsi dapat terjadi (Gupta dkk., 2019). Selain itu, pertukaran informasi yang dikumpulkan secara intensif di Industri 4.0 merupakan rintangan utama dalam jumlah kepercayaan yang dibutuhkan, dasar hukum kedaulatan data, dan prasyarat teknis. Hal ini menyebabkan banyak konflik, seperti ketakutan akan perilaku oportunistik atau risiko keamanan yang membutuhkan dialog ekstensif antara perusahaan, entitas politik, dan masyarakat. Di atas segalanya, konsumen akhir semakin didorong untuk memberikan informasi tentang produk fisik melalui siklus tertutup, di samping pengumpulan data penggunaan produk virtual.

Topik lain yang harus dikaji secara kritis adalah penciptaan lapangan kerja baru melalui Industri 4.0. Model bisnis baru diharapkan dapat menciptakan lapangan kerja baru. Namun, perubahan melalui Industri 4.0 ini juga akan menghilangkan pekerjaan tertentu. Tenaga kerja manual berisiko menjadi otomatis dan akhirnya hilang. Selain itu, kehilangan pekerjaan tersebut tidak lagi hanya memengaruhi tugas fisik atau manual, tetapi juga pekerjaan kerah putih⁷ intelektual dan kognitif.

Secara khusus, perkembangan menuju pembelajaran mesin yang lebih baik dan kecerdasan buatan yang ditingkatkan, terlihat sebagai pendorong utama untuk perubahan dalam ketersediaan pekerjaan ini. Meskipun tidak dapat disangkal bahwa pasar tenaga kerja akan dipengaruhi oleh Industri 4.0, masih diperdebatkan bagaimana perkembangan ini akan berdampak pada profil pekerjaan tertentu atau apakah program pelatihan yang memadai akan tersedia. Dalam konteks ekonomi sirkular, dapat diasumsikan bahwa peluang kerja baru akan muncul untuk profil pekerjaan berpenghasilan rendah karena aktivitas penggunaan kembali dan remanufaktur dalam model linier produksi dan konsumsi adalah lebih bersifat padat karya daripada padat modal.

Selain itu, Industri 4.0 dapat mengarah pada konsumsi energi yang lebih tinggi (Stock dkk., 2018). Dengan koneksi terus-menerus antar mesin pintar, bahkan untuk seluruh siklus hidup, dalam kasus produk pintar sejumlah besar energi tambahan akan dibutuhkan di masa depan. Secara khusus, sistem produksi pintar diprediksi akan meningkatkan konsumsi energi secara drastis karena diperlukan pembangunan pusat data besar yang baru. Pusat data ini diperlukan untuk memproses data yang dikumpulkan dan mendukung distribusi jaringan di seluruh perusahaan dan seluruh rantai nilai.

Peningkatan penggunaan jaringan internet yang dihasilkan merupakan faktor lain dalam konsumsi energi yang lebih tinggi

⁷ Pekerja kerah putih adalah seorang profesional bergaji atau pekerja terdidik yang melakukan tugas semi-profesional di kantor, administrasi, dan koordinasi penjualan, berbeda dengan pekerja kerah biru, yang pekerjaannya membutuhkan tenaga kerja manual.

melalui Industri 4.0. Meskipun jaringan pintar merupakan perkembangan yang menjanjikan untuk menyediakan pasokan energi hijau yang berkelanjutan melalui solusi penyimpanan canggih, masih harus dilihat apakah kebutuhan energi dapat dipenuhi sepenuhnya dengan sumber energi terbarukan. Singkatnya, sangat penting untuk menyeimbangkan penghematan energi melalui Industri 4.0 dengan kebutuhan energi tambahan.

Selain itu, peningkatan konsumsi energi yang sudah disajikan melalui integrasi perangkat pintar, juga penting untuk menyadari bahwa peralatan ini harus diproduksi terlebih dahulu sehingga membutuhkan sumber daya yang signifikan. Secara khusus, mengenai integrasi horizontal lintas batas perusahaan, menjadi jelas bahwa banyak perangkat pintar akan diperlukan di seluruh rantai nilai⁸ di masa depan. Oleh karena itu, muncul pertanyaan mengenai siapa yang memiliki data dan perangkat, serta siapa yang akan mengatur penggantian perangkat karena peningkatan jumlah perangkat juga menyebabkan peningkatan pemborosan.

Di sisi lain, seluruh potensi Industri 4.0 hanya dapat dimaksimalkan jika semua pemangku kepentingan bekerja sama dan berbagi informasi. Perusahaan besar diperkirakan akan mendorong perkembangan ini, sedangkan usaha kecil dan menengah (UKM) mungkin lebih terhambat karena tantangan investasi yang tinggi dan kekhawatiran transparansi (Waibel dkk., 2017). Selain itu, pertanyaan tentang pengukuran upaya pencapaian tujuan di ketiga dimensi TBL dapat terhambat oleh tujuan yang tidak selaras dan visi bersama, serta data yang tidak mencukupi. Selanjutnya, potensi konflik antara optimasi lokal dan global dalam rantai pasok dapat muncul, yaitu konflik antara menerapkan prinsip *lean* dalam organisasi tunggal di sepanjang rantai pasok dan membangun ekonomi sirkular di seluruh rantai pasok.

⁸ Rantai nilai adalah serangkaian aktivitas yang dilakukan oleh perusahaan yang beroperasi di industri tertentu untuk memberikan produk yang berharga barang dan/atau jasa untuk pasar.

Lebih lanjut, implementasi dan pemahaman konsep ekonomi sirkular sulit dioperasionalkan untuk manajemen, berbeda dengan pernyataan politik. Oleh karena itu, banyak penekanan perlu ditempatkan pada ekonomi sirkular, langkah-langkah terkait Industri 4.0, dan interaksinya.

Terakhir, implementasi Industri 4.0 di seluruh rantai pasok membutuhkan standar teknologi umum dan strategi serta langkah implementasi yang jelas dan selaras dengan mitra. Namun, transformasi pasca-Industri 4.0 di SCM masih melibatkan risiko model bisnis yang semakin berkurang, kehilangan daya tawar, atau kehilangan posisi kompetitif secara keseluruhan. Oleh karena itu, strategi ekonomi rasional tersebut harus diselaraskan dengan potensi ekonomi, ekologi, dan sosial. Jika tidak, potensi optimasi global yang disebutkan sebelumnya dapat hilang karena pendekatan lokal untuk perusahaan tunggal.

B. Aplikasi Industri 4.0 untuk Manajemen Rantai Pasok Sirkular

Dalam beberapa tahun terakhir, penting untuk mengarahkan fokus pada konsep-konsep yang disruptif, seperti industri 4.0 dan ekonomi sirkular. Analisis data tingkat lanjut, teknik peramalan, perangkat IoT, dan aplikasi *blockchain*, antara lain digunakan untuk memenuhi kebutuhan rantai pasok modern yang memerlukan fleksibilitas pasokan, metode, dan proses untuk meningkatkan produktivitas, pengurangan atau nol limbah, optimalisasi sumber daya, serta praktik konsumsi dan produksi yang lebih berkelanjutan. Tuntutan dari beberapa pemangku kepentingan serta aspek lingkungan dan sosial, telah menempatkan konsep ekonomi sirkular dalam agenda bisnis utama dan perusahaan telah menyadari bahwa pengembangan praktik yang lebih berkelanjutan sangat mendesak. Faktor penentu keberhasilan yang menguntungkan produktivitas, efisiensi sumber daya, dan pengurangan limbah adalah digitalisasi proses dan penerapan praktik yang menggunakan peralatan yang lebih cerdas. Studi oleh Manavalan dan Jayakrishna (2019) telah menyatakan bahwa “perusahaan manu-

faktor perlu mempercepat pengalihan fokus menuju keberlanjutan dan memanfaatkan teknologi, seperti ‘*Internet of Things*’ (IoT) untuk memenuhi tujuan organisasi”.

Dengan pemikiran ini, solusi yang menggabungkan teknologi industri 4.0 diidentifikasi sebagai faktor kunci keberhasilan pengembangan ekonomi sirkular. Beberapa model telah dikembangkan dalam literatur yang menggabungkan kedua konsep. Misalnya, Rosa dkk. (2020) memberikan kerangka kerja yang menghubungkan ekonomi sirkular dan industri 4.0, sedangkan Kouhizadeh dkk. (2020) menyelidiki dampak dari teknologi industri 4.0 (*blockchain*) pada transformasi menuju ekonomi sirkular. Dalam perspektif ini, ekonomi sirkular, produksi bersih, dan praktik Industri 4.0 diselidiki oleh Gupta dkk. (2019) yang menemukan bahwa keterlacakan rantai pasok bersama dengan penggunaan kembali dan daur ulang adalah beberapa praktik utama bagi produsen yang ingin meningkatkan keberlanjutan. Praktik Industri 4.0, seperti teknologi *blockchain*, menghasilkan peningkatan kinerja ekonomi sirkular dengan mengurangi biaya transaksi dan memperkuat komunikasi rantai pasok sembari mengurangi jejak karbon.

1. Manajemen Rantai Pasok Sirkular

Dalam dekade terakhir, *Sustainable Supply Chain Management/* Manajemen Rantai Pasok Berkelanjutan (SSCM) telah dikembangkan untuk memungkinkan pengelolaan material, informasi, dan aliran modal sebagai kerja sama antar-perusahaan di sepanjang rantai pasok sembari mempertimbangkan tujuan dari ketiga dimensi pembangunan berkelanjutan, yaitu ekonomi, lingkungan, dan sosial, yang berasal dari kebutuhan konsumen dan pemangku kepentingan. Sebagaimana dicatat, SSCM menekankan keseimbangan antara perlindungan lingkungan, pertumbuhan ekonomi, dan pembangunan sosial. Sejalan dengan itu, paradigma ekonomi sirkular berkembang sebagai pendekatan yang bertujuan untuk mempertahankan sirkularitas sumber daya dan energi dalam rantai siklus tertutup. Ekonomi sirkular didefinisikan sebagai sistem ekonomi yang meminimalkan

konsumsi sumber daya dan menghilangkan pemborosan, sembari berfokus pada kelangsungan pembangunan ekonomi.

Dengan kombinasi SSCM dan ekonomi sirkular, konsep Manajemen Rantai Pasok Sirkular/*Circular Supply Chain Management* (CSCM) juga telah dikembangkan. Salah satu studi pertama yang berfokus pada rantai pasok sirkular adalah dari Thierry dkk. (1995) yang menyelidiki manajemen pemulihan produk. Dalam studi yang sama, mereka merancang kerangka rantai pasok terintegrasi sehingga produk yang dikembalikan dari konsumen akhir dapat digunakan kembali, diperbaiki, diproduksi ulang, atau didaur ulang.

Literatur tentang rantai pasok ekonomi sirkular dilanjutkan dengan fokus pada rantai pasok siklus tertutup⁹ (Guide & Van Wassenhove, 2009) dan logistik terbalik¹⁰ (Govindan dkk., 2015). Berdasarkan hal di atas, CSCM didefinisikan sebagai konfigurasi dan koordinasi fungsi organisasi pemasaran, penjualan, R&D, produksi, logistik, TI, keuangan, dan layanan konsumen di dalam dan di seluruh unit bisnis dan organisasi. CSCM bertujuan untuk menutup, memperlambat, mengintensifkan, mempersempit, dan menghilangkan material dan siklus energi. Hal ini digunakan untuk meminimalkan *input* sumber daya, limbah, dan kebocoran emisi keluar dari sistem; meningkatkan efektivitas dan efisiensi operasi; dan menghasilkan keunggulan kompetitif.

Dikatakan bahwa prinsip ekonomi sirkular menjadi sangat penting bagi berbagai pemangku kepentingan rantai pasok (pemerintah daerah, pengusaha, industri konstruksi, lembaga keuangan) untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, sembari menggunakan sumber daya alam secara lebih berkelanjutan. Oleh karena itu, CSCM terkait erat dengan praktik manajemen rantai pasok berkelan-

⁹ Rantai pasok siklus tertutup mengacu pada semua logistik ke arah depan dalam rantai (seperti pengadaan bahan, produksi dan distribusi) serta logistik terbalik untuk mengumpulkan dan memproses kembali (bekas atau tidak terpakai) produk dan/atau bagian dari produk untuk memastikan pemulihan yang berkelanjutan secara sosial-ekonomi dan ekologis.

¹⁰ Logistik terbalik adalah semua operasi yang terkait dengan penggunaan kembali produk dan material.

jutan yang berfokus pada pengurangan dampak negatif yang tidak diinginkan pada lingkungan akibat aliran material *cradle-to-grave*¹¹ (Prahinski & Kocabasoglu, 2006). Cara berpikir siklus hidup baru ini menunjukkan bahwa sampah dapat digunakan sebagai sumber daya alternatif yang menawarkan peluang bisnis baru sembari melindungi lingkungan.

2. Aplikasi Industri 4.0 pada Ekonomi Sirkular

Kita bisa dengan mudah mendapatkan berbagai penelitian yang mengidentifikasi perlunya inovasi industri 4.0 dengan menggunakan alat dan teknologi, seperti *big data* dan IoT untuk secara positif memengaruhi manajemen rantai pasok sirkular. Efisiensi dalam operasi dan manajemen material yang mengarah pada penghematan biaya dan peningkatan penggunaan sumber daya adalah pendorong utama penerapan CSCM. Pertukaran informasi antara mitra rantai pasok dan metode peramalan yang memberikan hasil yang andal dan mengurangi produksi limbah, dinilai sebagai faktor penting untuk CSCM.

Sejalan dengan faktor-faktor kritis di atas, tekanan pemangku kepentingan dari pemerintah, Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM), mitra rantai pasok, persaingan, serta tingkat kemampuan beradaptasi yang rendah dan masuknya pasar yang tertunda, menunjukkan bahwa perusahaan perlu memperhatikan pertimbangan yang sama terhadap isu-isu lingkungan, sosial dan ekonomi. Karakteristik kompleks dan dinamis dari faktor-faktor ini meningkatkan ketidakpastian dalam rantai pasok. Untuk mengatasi tantangan ini, solusi dari domain industri 4.0 telah dikembangkan untuk mendesain ulang rantai pasok menuju penciptaan jaringan digital. Tseng dkk. (2018) menyoroti perlunya analisis berbasis data besar untuk mengevaluasi kepercayaan, budaya, dan perilaku dalam rantai pasok dan jaringan lintas industri untuk meningkatkan keberlanjutan. Dalam domain logistik kota, aplikasi pengumpulan cerdas untuk pengelolaan sampah dengan

¹¹ Istilah ini digunakan dalam sejumlah konteks bisnis, tetapi biasanya dalam tanggung jawab perusahaan untuk menangani limbah berbahaya dan kinerja produk.

menggunakan teknologi *Internet of Things* (IoT) berpotensi untuk diterapkan.

Di lingkungan industri, IoT dikerahkan untuk mengukur tingkat pengisian tempat sampah, sembari mengoptimalkan rute transportasi sampah logam bekas. Solusinya adalah perluasan dari platform Smart Waste Management. Selain berfungsi sebagai pemantau jarak limbah, platform ini juga menyediakan serangkaian layanan analitik yang mengoptimalkan prosedur rantai pasok yang terkait dengan alokasi dan perencanaan sumber daya.

Dalam rantai pasok pembuatan kapal (Ramirez-Peña dkk., 2020) telah dieksplorasi isu-isu keberlanjutan dari sudut pandang industri 4.0. Hasil mereka telah menghubungkan 12 teknologi pendukung utama (*Internet of Things, Artificial Intelligence, Big Data, Autonomous Robots, Cybersecurity*, dll.) dengan empat pendekatan rantai pasok (*Lean, Agile, Resilience, dan Green*). Penerapan Industri 4.0 dan ekonomi sirkular di sektor otomotif telah menunjukkan bahwa penerapan praktik 6R (*recycle, reuse, reduce, refuse, rethink, and repair*), *eco-design* produk dan penilaian siklus hidup, dan digitalisasi rantai pasok adalah proposisi peringkat teratas untuk mengatasi tantangan SSCM.

Dalam solusi rantai pasok *Internet of Things* (IoT) industri pangan, memungkinkan keberlanjutan dan memiliki kemampuan untuk mengurangi timbulnya limbah, biaya, emisi, dan dampak sosial. Di sektor sepatu kulit, Papetti dkk. (2019) telah mengusulkan *platform* berbasis web untuk ketertelusuran pemasok dan produk di sepanjang rantai pasok produk. Temuan mereka menunjukkan bahwa platform tersebut adalah solusi pengambilan keputusan yang berguna dan dapat meningkatkan keberlanjutan lingkungan rantai pasok. Penerapan solusi industri 4.0 memberikan peningkatan keberlanjutan di tingkat perusahaan dan di tingkat rantai pasok. Lebih khusus, hasil mereka menunjukkan 20% pengurangan waktu dari pemantauan besi tua dan pengurangan 4% dari generasi besi tua berdasarkan prosedur pemeliharaan prediktif.

3. Dari Sampah Menjadi Energi

Target baru Komisi Eropa mengenai kebijakan energinya mengusulkan peningkatan penggunaan energi terbarukan sebesar 27% dan pengurangan emisi gas rumah kaca sebesar 30% pada tahun 2030 (European Commission, 2012). Penggunaan limbah dan biomassa sebagai sumber daya terbarukan, sangat meningkat dalam dekade terakhir. Bahan limbah terbarukan dipandang sebagai sumber energi yang berkelanjutan. Khususnya pada limbah kayu, yang merupakan bahan yang diubah menjadi energi bermanfaat melalui teknologi limbah menjadi energi, seperti pembakaran. Pembakaran limbah kayu termasuk dalam kategori pemulihan energi, berdasarkan kebijakan hierarki pengelolaan limbah Eropa.

Dari sudut pandang kesehatan dan keselamatan, Torres-Duque dkk. (2008) menemukan bahwa selama pembakaran biomassa, sejumlah zat yang dipancarkan dapat mencemari, mengiritasi, atau mengembangkan senyawa karsinogenik. Oleh karena itu, untuk mengurangi emisi GRK yang disebabkan oleh penggunaan kayu murni sebagai bahan bakar nabati, diperlukan solusi pengelolaan limbah kayu yang berkelanjutan. Misalnya, limbah kayu dari sektor furnitur, yang sebagian besar tidak digunakan untuk energi, tetapi dapat diubah menjadi sumber daya yang menjanjikan untuk produksi bahan bakar nabati.

C. Pengenalan *Food Supply Chain* dan *Short Food Supply Chain*

Perekonomian dunia berkembang pesat, akibatnya kebutuhan transportasi dan logistik barang meningkat. Oleh karena itu, penting adanya perencanaan yang memadai oleh pembuat kebijakan, pemerintah, bisnis, dan pemangku kepentingan lainnya untuk memenuhi kebutuhan sosial, ekonomi, dan lingkungan dari jaringan rantai pasok yang tumbuh cepat. Investasi lebih besar diperlukan dalam infrastruktur yang dirancang dengan baik untuk memastikan operasi logistik aman dan cepat, dengan fokus pada teknologi modern terbaru dan sistem transportasi cerdas untuk memungkinkan perencanaan dan koordinasi operasi logistik yang efisien.

Selama dua dekade terakhir, manajemen rantai pasok berkelanjutan (*sustainable supply chain/SSC*) telah menarik perhatian yang semakin besar dari sektor industri dan akademisi. SSC didefinisikan sebagai pengelolaan operasi rantai pasok, dana, informasi, dan sumber daya untuk memaksimalkan keuntungan rantai pasok, sembari memaksimalkan kesejahteraan sosial dan meminimalkan dampak lingkungan. Banyak konsumen mengharapkan perusahaan manufaktur dan penyedia layanan mengadopsi praktik keberlanjutan dalam operasi rantai pasok mereka dan menyelaraskan kegiatan perusahaan menuju pencapaian tujuan lingkungan dan sosial sembari mencari harga yang lebih rendah dan saling terkait dengan pembangunan ekonomi. Sektor pertanian menjadi perhatian khusus dalam konteks peningkatan keberlanjutan; sebagai penghasil emisi gas rumah kaca (GRK) terbesar kedua (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014) sektor ini telah berdampak negatif terhadap lingkungan sementara, juga mewakili sumber pangan, pendapatan, dan pekerjaan, terutama bagi penduduk pedesaan dunia.

Selama 50 tahun terakhir, produsen agrobisnis tidak hanya menyediakan platform untuk pertumbuhan ekonomi, tetapi juga telah membantu jutaan orang keluar dari kemiskinan di seluruh dunia. Namun, seperti yang dinyatakan oleh Searchinger dkk. (2019), kita masih menghadapi tantangan dalam menyediakan pangan yang cukup untuk populasi dunia yang terus meningkat, yang diproyeksikan mencapai 10 miliar pada tahun 2050. Menurut statistik kelaparan pada tahun 2017, hampir 1 dari 9 orang (sekitar 821 juta orang) kelaparan di dunia (FAO, 2018). Sementara itu, seperempat dari pangan yang diproduksi untuk konsumsi manusia terbuang melalui jaringan *Agriculture Supply Chain/Rantai Pasok Pertanian (ASC)* dalam perpindahan dari ladang hingga tersaji di meja makan.

Di satu sisi, kita perlu meningkatkan produksi pangan di sektor pertanian untuk memberi makan semua orang dan menghindari kekurangan pasokan pangan yang dibutuhkan di dunia secara dramatis. Di sisi lain, peningkatan produksi dan distribusi pangan dapat mengakibatkan tingkat emisi GRK yang lebih tinggi dan

terus berlanjutnya konversi hutan menjadi lahan pertanian, dengan konsekuensi menyebabkan erosi lahan dan deforestasi yang parah. Selain itu, diakui secara luas bahwa sistem ASC dapat secara signifikan merusak ekosistem dengan penggunaan sumber daya alam secara besar-besaran sebagai *input* atau membuang dan mencemarinya dalam siklus pangan.

Di sektor pertanian, rantai pasok juga memegang peranan penting, memberikan kontribusi hingga 40% terhadap nilai produksi pertanian global (Enahoro dkk., 2019). Perubahan kebiasaan makan baru-baru ini, seiring dengan pertumbuhan populasi, dengan cepat meningkatkan permintaan akan pangan yang berasal dari ternak yang menjadi tantangan signifikan bagi keberlanjutan. Seperti yang dikemukakan oleh Enahoro dkk. (2019), peningkatan jumlah hewan dan produksi pangan yang berasal dari ternak dapat menimbulkan beberapa masalah lingkungan, termasuk peningkatan emisi GRK, pencemaran tanah dan air, serta masalah sosial, seperti meningkatnya jumlah penyakit yang berasal dari hewan. Selain itu, sektor peternakan merupakan salah satu pendorong utama perubahan penggunaan lahan, hampir 33% dari lahan pertanian global digunakan untuk pakan ternak (Zef dkk., 2020). Menjelajahi pelestarian lahan pertanian yang cukup untuk memasok pangan bagi populasi global yang diperkirakan 10 miliar pada tahun 2050, FAO memproyeksikan 40% dari semua tanaman yang saat ini diproduksi untuk pakan ternak, perlu digunakan langsung untuk konsumsi manusia (FAO, 2012).

Dari tahun 1980-an, bentuk baru pengelolaan bisnis banyak bermunculan. Hal ini mendorong perusahaan-perusahaan di sektor pertanian pangan untuk lebih mengembangkan hubungan mereka. Oleh karena itu, pergeseran paradigma diamati dalam teori manajemen, perusahaan tidak lagi bersaing sebagai individu independen, tetapi mulai bertindak sebagai rantai pasok. Ketika persaingan antarjaringan meningkat, perusahaan mengacu pada kemampuan mereka untuk mengintegrasikan diri ke dalam rantai sebagai tanda keberhasilan dan mengembangkan kolaborasi mereka. Akibatnya, dalam berbagai literatur yang telah luas dibuat, MacCarthy dkk. (2016) memaksa

perusahaan untuk mencari bentuk arus koordinasi yang lebih efektif, baik di dalam maupun di luar perusahaan.

Mempertimbangkan praktik pertanian dan agroindustri, kekhawatiran baru telah muncul di bidang lingkungan, keamanan, dan kesehatan pangan, seperti kesejahteraan hewan dan ekologi, serta keberlanjutan. Oleh karena itu, pengembangan *Short Food Supply Chains* (SFSCs) menjadi terkenal dalam beberapa tahun terakhir, terutama untuk karakteristik lokal mereka dan dimensi ekologi, lingkungan, serta sosial.

SFSC telah muncul sebagai tanggapan terhadap kekhawatiran publik tentang asal dan penanganan pangan yang timbul dari modernisasi dan mekanisasi sistem pangan. Kondisi ini telah diintensifkan oleh kekuatan monopoli produsen pertanian pangan skala besar yang berusaha mengendalikan sebagian besar Rantai Pasok Pangan (FSC/*Food Supply Chain*) yang menyebabkan terputusnya hubungan antara petani dan konsumen akhir sehingga menghasilkan hubungan anonim yang jauh.

Sementara itu, kedua pendekatan ini mempelajari fenomena serupa, FSC dan SFSC terjalin dengan elemen berbeda yang menganggap kedua model rantai bersaing satu sama lain. Dalam studi SFSC ditemukan upaya untuk mengarakterisasi model ini sebagai rantai pangan alternatif, atau jaringan pangan alternatif, atau sistem alternatif, memperpendek FSC, dan membangun rantai ini secara paralel. SFSC dianggap oleh banyak orang lebih berkelanjutan secara ekonomi, sosial dan lingkungan, 'lebih alami' dan 'lebih lokal', bahkan 'lebih sehat'.

Mengenai masalah kesehatan dan lingkungan, perubahan terjadi di FSC dan SFSC yang mengarah ke masalah baru, yaitu mendesain ulang FSC untuk meningkatkan kelestarian lingkungan, memperpendek FSC untuk menghasilkan produk dengan kualitas tinggi dan ketertelusuran, serta meningkatkan SFSC.

Dalam hal ini, fokusnya tidak menyangkut penggantian rantai panjang dengan rantai pendek, tetapi strategi harus secara progresif memperkuat sektor dan kegiatan ekonomi yang memungkinkan

integrasi semakin banyak pelaku yang terlibat dalam kedua rantai pertanian pangan. Mengingat bahwa faktor pendorong FSC dan SFSC hadir dalam ruang dan waktu yang sama maka kedua model bisnis tersebut hidup berdampingan.

Dengan berkembangnya hubungan antarperusahaan pertanian pangan ini, dimungkinkan untuk mengamati perubahan paradigma, di mana perusahaan mulai membentuk bagian dari rantai atau jaringan, dan FSC muncul. Setelah munculnya paradigma ini, muncul kekhawatiran baru tentang asal usul pangan, sering kali kekhawatiran ini diakibatkan oleh pemutusan hubungan antara produsen dan konsumen. Akibatnya, muncul rantai/jaringan alternatif, yaitu SFSC.

D. Perbedaan FSC dan SFSC

Dengan globalisasi, perusahaan perlu beradaptasi dengan standar persaingan baru, terkait dengan faktor lingkungan dan kualitas. Strategi bisnis baru telah muncul untuk meningkatkan, tidak hanya efisiensi individu, tetapi juga kolektif. Para akademisi telah mengusulkan perspektif yang berbeda dari hubungan antara perusahaan, pemasok dan konsumen. Perspektif ini muncul sebagai pendekatan baru yang terintegrasi, disederhanakan, dan dikelola dengan tepat (Lambert & Cooper, 2008). Dari sudut ini, muncul konsep rantai pasok (*supply chain*) dan manajemen rantai pasokan (*supply chain management*), bersama dengan konsep serupa, seperti jaringan pasokan, pendekatan seluruh rantai, dan bahkan nilai bersih.

Berfokus pada jenis rantai pertama, *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP) telah mendefinisikan rantai pasok/*supply chain* (SC) sebagai seperangkat koneksi di antara berbagai organisasi, dimulai dengan bahan mentah yang belum diproses dan diakhiri dengan konsumen akhir (CSCMP, 2013). Oleh karena itu, rantai pasok adalah pertukaran bahan dan informasi dalam proses logistik yang terdiri atas semua tautan dan hubungan antara asal bahan baku dan konsumen akhir. Dengan kata lain, konsep ini menekankan konsumen dianggap sebagai anggota rantai pasok.

Objek penelitian SC terletak pada manajemen rantai pasok, terutama dalam mengidentifikasi kegiatan utama untuk proses di dalam dan di antara perusahaan agar dapat mempromosikan integrasinya demi memenuhi harapan konsumen dan pelaku rantai. Oleh karena itu, perlu dicatat bahwa SC ini eksis, baik dikelola maupun tidak.

Ada karakteristik saling ketergantungan antarpelaku usaha dalam rantai tertentu. Saling ketergantungan ini terlihat dari berbagai hubungan melalui rantai dan menentukan keberhasilannya. Saling ketergantungan ditentukan oleh perilaku ekonomi melalui konvergensi tujuan. Namun, interaksi, hubungan, dan perilaku para aktor tidak mewakili skenario realitas sosial dan budaya yang terdislokasi atau terputus di mana mereka berada. Menurut Mikkola (2008), hubungan antaraktor SC sangat terwakili berdasarkan komponen sosial, seperti kepercayaan dan modal sosial.

Fokus utama dari pendekatan rantai pasok adalah nilai yang akan dibangun di dalam rantai untuk kemudian diberikan kepada mitra bisnis dan konsumen. Perlunya keterkaitan strategi yang digunakan untuk menciptakan nilai dalam rantai, terutama pilihan tata kelola dan kebutuhan nilainya, didukung oleh metode struktur, perilaku, dan kinerja.

Koordinasi rantai pasok cenderung menghasilkan nilai bagi para aktor yang tergabung dalam jaringan ini mencari efisiensi sumber daya dan kemitraan. Selain itu, “pengetahuan tentang semua aktivitas nilai tambah dalam rantai pasok sangat penting untuk pemodelan terkoordinasi” (Thomas & Griffin, 1996). Proses koordinasi melibatkan fenomena yang dapat diselidiki dalam perspektif yang berbeda, terutama dalam literatur pemasaran dan ekonomi.

Rantai pertanian pangan menjadi blok bangunan yang signifikan untuk teori baru pembangunan pedesaan. Rantai pasok produk pertanian mendapat banyak perhatian karena terkait dengan masalah kesehatan masyarakat. Seiring dengan kemunculannya, muncul topik, seperti jaringan lokal dan nonlokal, kompleksitas produk pangan yang mudah rusak yang dihadapi oleh manajemen rantai pasok, dan ketergantungan pada sumber daya alam.

FSC berdampak pada lingkungan, seperti limbah pangan dan emisi Gas Rumah Kaca, menghadapi beberapa masalah sosial dan masalah etika, seperti keamanan pangan dan kesejahteraan hewan. Visibilitas publik yang lebih besar dari industri pertanian pangan dan tekanan eksternal yang dirasakan, telah mendorong penerapan standar manajemen mutu internasional dan sistem manajemen keamanan pangan (*FSMS/Food Safety Management System*) di seluruh dunia.

Mempertimbangkan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB) dari Agenda Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) 2030 yang bertujuan untuk mendorong integrasi keberlanjutan ke dalam organisasi di seluruh dunia, FSC sangat relevan untuk sebagian besar tujuan, seperti nol kelaparan (TPB02), kesehatan dan kesejahteraan yang baik (TPB03), air bersih dan sanitasi (TPB06), konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab (TPB12), dan aksi iklim (TPB13).

Kekhawatiran baru yang mengarah pada desain ulang, reposisi rantai pasok, dan konsep baru, seperti rantai pasok berkelanjutan, rantai pasok hijau, jaringan konvensional dan jaringan pangan alternatif, telah muncul sebagai SFSC. Pendekatan ini dapat mewakili orientasi dan koordinasi rantai pasok alternatif, mencari hubungan yang lebih dekat antara pelaku rantai dan konsumen, yang menciptakan proses yang lebih baik dan bersama-sama mengembangkan produk dan layanan baru, seperti yang dibahas di bawah ini.

1. *Short Food Supply Chain (SFSC)*

SFSC telah muncul dari perubahan kebiasaan konsumen di seluruh produk, industrialisasi, dan globalisasi pangan. Krisis yang dihadapi oleh model produksi konvensional mengenai masalah kesehatan, meningkatnya kekhawatiran konsumen tentang ekologi, kesehatan dan kesejahteraan hewan, terutama asal-usul, dan kualitas dari pangan yang diproduksi oleh model pertanian konvensional, adalah akar dari pengembangan kerangka SFSC.

Cara baru konsumsi dan produksi berdasarkan pilar keberlanjutan dan regionalitas diperkenalkan, seperti yang disajikan oleh Ilbery & Maye (2005) dan disarankan oleh Komisi Kebijakan untuk

Masa Depan Pertanian dan Pangan (Policy Commission, 2002). Oleh karena itu, konteks SFSC memungkinkan kontur yang mendukung pendekatan lain terhadap fenomena pertanian pangan.

Isu-isu, seperti kedekatan geografis atau relasional, metode produksi tradisional, pola perilaku konsumen, regionalisme, interaksi antara sistem produksi dan konsumen, dan kualitas pangan yang lebih baik dan lebih sehat, diajukan sebagai kemungkinan dan alternatif baru untuk sistem produksi dan pemasaran pangan, dan SFSC merupakan alternatif dari kecenderungan ini.

Mengenai karakteristik tradisional suatu produk pangan, Gellynck & Kühne (2008) mendefinisikannya dengan kriteria berikut:

- a) Tahapan produksi kunci suatu produk pangan tradisional harus dilakukan di suatu wilayah tertentu, baik yang bersifat nasional, regional maupun lokal.
- b) Produk pangan tradisional harus otentik dalam resep (campuran bahan), asal bahan baku, dan/atau proses produksinya.
- c) Produk pangan tradisional harus telah tersedia secara komersial setidaknya selama 50 tahun.
- d) Harus menjadi bagian dari warisan gastronomi daerah tersebut.

Dua kriteria pertama menguatkan karakteristik SFSC yang disajikan oleh Goodman dan Watts (1997) mengenai regionalitas produk dan oleh Renting dkk. (2003) tentang asalnya, yaitu informasi produk yang menjelaskan bahan baku dan metode produksi yang digunakan.

Oleh karena itu, hal ini merupakan posisi yang saling terkait dalam cara baru untuk memahami, menganalisis, dan mempelajari SFSC. Fokusnya adalah menghasilkan alternatif dan peluang untuk pembangunan pedesaan dan rantainya melalui pendekatan yang melihat keselarasan antara produksi dan konsumsi, berdasarkan karakteristik lokal dan regional, serta tradisi. Dengan demikian, pendekatan ini dicirikan sebagai rantai pangan alternatif atau jaringan pangan alternatif atau sistem alternatif yang memperpendek rantai pasok pangan (FSC) dan didirikan secara paralel dengan mereka.

SFSC menawarkan potensi untuk mengubah “mode industri” produksi pangan dan mengembangkan rantai pasok. Penerapan SFSC diharapkan dapat “memperpendek” rantai pasok industri pangan yang panjang, kompleks, dan terorganisasi secara rasional, dengan proporsi penurunan total nilai tambah dalam produksi pangan diterima oleh petani.

Penekanan ditempatkan pada jenis hubungan dan interaksi antara petani dan konsumen, serta pada peran hubungan dalam membangun nilai dan makna. Renting dkk. (2003) memperluas pandangan SFSC dengan menekankan bahwa SFSC tidak hanya terdiri atas langkah-langkah di suatu wilayah. SFSC mampu membentuk jaringan internasional yang melibatkan petani/produsen dan konsumen yang dapat melampaui batas negara dan pasar, misalnya sertifikat asal produk, label perdagangan yang adil, dan penunjukan label asal.

Dalam perspektif yang sama, Whatmore dan Thorne (1997) mencatat perlunya struktur tata kelola dan mediasi untuk melestarikan karakteristik SFSC. Namun, terdapat kemungkinan konflik kepentingan dalam rantai pangan, yang dapat dilihat secara positif terkait dengan aspek keberlanjutan (sosial, ekonomi, dan lingkungan) dan dapat memberikan peluang untuk kemungkinan baru koeksistensi¹² antara rantai pasok di pasar.

Ada kebutuhan untuk memisahkan dan memperjelas konsep yang dikembangkan dalam SFSC. Definisi yang jelas tentang rantai pasok konvensional dan alternatif dapat mengurangi masalah di antara para pelaku rantai sehingga mendorong munculnya kemungkinan proses koordinasi dan tata kelola hibrida. Mengenai istilah “alternatif”, hal ini didefinisikan sebagai bentuk rantai pasok pertanian pangan yang tidak konvensional. Preferensi penggunaan kata “pendek” karena merupakan sebutan umum untuk menentukan jenis rantai.

Strategi bertahan pasar SFSC dapat memberikan pengaruh pada peluang pasar pertanian pangan. Pada akhirnya, peluang pasar tersebut mendorong proses perubahan dalam perilaku internal rantai (dan

¹² Koeksistensi dari satu hal dengan yang lain adalah kenyataan bahwa mereka ada bersama-sama pada waktu yang sama atau di tempat yang sama.

juga di antara mereka), menciptakan dikotomi yang konvensional, dan alternatif agar tetap kompetitif dan bertahan dalam aktivitas.

Mikkola (2008) menyatakan bahwa jaringan jarang ditampilkan dalam bentuk ideal/tipikal murni karena dalam praktiknya, diamati sebagai campuran bentuk, yaitu menghasilkan bentuk jamak atau mode hibrid. Ilbery dan Maye (2005) memberikan kesempatan untuk melihat sekilas koeksistensi antara SFSC dan FSC sebagai model hibrida atau permanen sesaat. Mekanisme perluasan SFSC, misalnya membuka kemungkinan untuk memaknai pembentukan hubungan dengan pelaku FSC konvensional guna memperoleh peningkatan geografis tanpa menghilangkan ciri tradisional dan kedaerahan yang dijamin oleh informasi produk. Oleh karena itu, ini membenarkan kebutuhan untuk memahami dinamika koeksistensi dan untuk mencapainya, perspektif konstruktivis digunakan, mengambil wawasan dari biologi dan kinerja pasar.

E. Konvergensi¹³ dan Divergensi¹⁴ antara FSC dan SFSC

Bagian ini bertujuan untuk memperkenalkan unsur-unsur diskusi agar lebih memahami bidang relasional konvergensi dan divergensi antara pendekatan FSC dan SFSC. Perbedaan dapat dibuat antara sistem pangan alternatif dan konvensional, meskipun tidak ada batasan yang jelas di antara keduanya. Konsep, perspektif, dan dimensi menyarankan kemungkinan persimpangan dan koeksistensi antara kerangka konseptual pada saat-saat tertentu, tetapi mereka juga menyoroti perbedaan antara model.

Berusaha memahami interaksi hubungan antaraktor, baik FSC dan SFSC bertujuan untuk menambah nilai melalui rantai. Didefinisikan sebagai seperangkat elemen dan praktik, setiap rantai menetapkan atribut yang berbeda untuk menambah nilai, seperti hubungan sosial, warisan budaya, keamanan dan kualitas pangan, faktor ekonomi, dan teknologi.

¹³ Fakta bahwa dua atau lebih hal, ide, dll. menjadi serupa atau bersatu

¹⁴ Situasi di mana dua hal menjadi berbeda.

SFSC menentukan nilai berdasarkan kualitas untuk memosisikan ulang konsep pangan, misalnya menghubungkan pangan secara langsung dengan praktik pertanian lokal, alam pedesaan, lanskap, dan sumber daya. Secara garis besar, SFSC didefinisikan dan diposisikan mengenai pengertian kualitas tertentu. Perlu dicatat pula bahwa proses konvergensi kepentingan dan tujuan yang membangun hubungan antara berbagai aktor dalam FSC dan SFSC secara bersamaan.

Meskipun kedua pendekatan ini membangun hubungan, mereka dijelaskan secara berbeda dalam strukturnya. Di FSC, ada fokus yang jelas pada struktur pengaturan aktor, dengan entitas bisnis dan rantai pasok. Organisasi ini mencari keterlibatan dan komitmen untuk tujuan bersama, seperti kepuasan konsumen di seluruh rantai pasok dan daya saing yang lebih besar di dalamnya. Ini dikonfigurasi melalui tiga atau lebih aktor yang terlibat langsung dengan promosi penjualan, seperti pemasok/vendor, produsen, perantara, grosir dan pengecer.

Sementara itu di SFSC, konfigurasi mereka berfokus pada produsen dan konsumen, membangun hubungan yang lebih dekat dan rekoneksi di antara mereka, bahkan hubungan persahabatan dengan tautan yang 'lebih dekat' dan lebih otentik. Ada fokus yang patut diperhatikan pada aktor tertentu, yaitu keluarga petani yang menerapkan SFSC merupakan cara terbaik untuk mendiversifikasi produk mereka, memperoleh nilai tambah yang lebih tinggi, dan dengan demikian menjamin pendapatan yang lebih stabil.

Melalui konfigurasi ini, hubungan yang berbeda di antara aktor-aktor ini dapat diamati. Untuk FSC konvensional, instrumen formal, seperti perjanjian kerja sama, persyaratan kerja sama, dan kontrak bertindak sebagai alat untuk mendukung kepentingan konvergen dan penciptaan nilai tambah oleh setiap hubungan rantai. Konvergensi kepentingan di SFSC juga dapat dibangun melalui instrumen formal, meskipun kesepakatan informal juga dijelaskan dalam literatur. Instrumen informal ini didasarkan pada kepercayaan, kerja sama atau asosiasi petani dalam upaya untuk mengidentifikasi rantai dan tujuan bersama yang memungkinkan konvergensi kepentingan di antara para aktor.

SFSC terkait erat dengan pengembangan bentuk baru dari asosiasi politik dan tata kelola pasar, terutama didasarkan pada wilayah dan kedekatan, sebagaimana disorot oleh Hinrichs (2000), “hubungan antara produsen dan konsumen tidak formal atau kontraktual, tetapi buah dari keakraban, kebiasaan dan sentimen, dibumbui oleh persepsi nilai di kedua sisi”. Mediasi antara hubungan yang hidup berdampingan di FSC dan SFSC diperlukan untuk mengevaluasi instrumen terbaik—formal atau informal—untuk memastikan penciptaan nilai dari perspektif setiap aktor.

Selain hubungan antaraktor rantai ini, SFSC mengembangkan jenis koneksi yang berbeda, yaitu hubungan spasial. Seperti yang didukung oleh Sonnino & Marsden (2006), tidak adanya referensi spasial untuk produk, tanpa dorongan untuk memahami asal pangan di FSC konvensional. Dengan demikian, produk FSC dianggap *spaceless*, artinya produk tanpa ruang dalam arti wilayah/tempat.

Literatur SFSC menyebutkan perhatian untuk menginformasikan konsumen tentang tempat produksi, proses produksi produk itu sendiri, dan kondisi spasial produksi lainnya karena produk dapat berbasis lokal atau regional. Elemen penting yang terkait dengan SFSC adalah gagasan tentang konteks lokal dan sosial. Dalam bentuk tidak langsung, Bowen (2010) menunjukkan tingkat keterlibatan di tempat-tempat lokal dalam ruang global, SFSC dan FSC dapat menghadirkan hubungan koeksistensi dalam ruang tertentu. Namun, ada kemungkinan perselisihan di antara para pelaku rantai.

Ciri-ciri konvergen dan divergen tersebut dirangkum dalam Tabel 3.1. Secara khusus disajikan perbandingan komponen-komponen fokus, yaitu tujuan, konfigurasi, hubungan antarpelaku rantai, kepentingan, hubungan spasial, dan kebutuhan sistem produksi dan konsumsi. Sonnino dan Marsden (2006) menyatakan bahwa dikotomi antara pangan terstandar dan lokal saat ini tidak sepenuhnya mewakili realitas sektor pangan, yaitu tidak ada batasan yang jelas antara kedua pendekatan ini, meskipun ada perbedaan abstrak di antara keduanya. Rantai pasok tidak statis. Sebaliknya, mereka berkembang dan

berubah dalam ukuran, bentuk dan konfigurasi, bagaimana mereka dikoordinasikan, serta dikendalikan dan dikelola.

Tabel 3.1 Perbedaan SFSC dan FSC

Indikator	SFSC	SFC
Tujuan	Kerja sama, integrasi, dan otonomi pelaku rantai pasok yang lebih besar; menghasilkan nilai bagi petani dan konsumen, serta alternatif dan peluang untuk pembangunan lokal pedesaan.	Kerja sama strategis untuk penciptaan nilai dan efisiensi seluruh rantai melalui proses integrasi yang penting bagi bisnis para pelaku rantai.
Konfigurasi	Jaringan interaksi antaraktor terutama berfokus pada mempertemukan produsen dan konsumen.	Pelaku cenderung di sekitar perusahaan membentuk jaringan berbagai bisnis.
Hubungan di antara pelaku rantai pasok	Kedekatan, formal dan informal, di antara para pelaku, terutama antara petani dan konsumen; hubungan berdasarkan pembangunan kepercayaan pada asal dan kualitas produk pangan. Perlu adanya integrasi yang lebih besar antarpetani lokal untuk memperkuat wilayah.	Perlunya integrasi yang lebih besar antaraktor untuk memperkuat rantai
Hubungan spasial	Relokasi; Pengetahuan konsumen tentang lokasi, produksi, produk dan kondisi spasial produksi; berbasis lokal dan regional.	Delokasi; Tidak adanya referensi spasial produk; tidak ada keperluan untuk memahami asal pangan; produk tanpa ruang/wilayah/tempat.
Fokus perhatian	Komunitas, regionalitas, pengembangan wilayah, memungkinkan petani untuk menangkap nilai lebih besar, dan menghasilkan nilai tambah bagi konsumen.	Difusi sepanjang rantai; secara umum, menghasilkan nilai tambah bagi berbagai pelaku rantai dan konsumen.

Indikator	SFSC	SFC
Kebutuhan sistem produksi dan konsumsi	Memberikan nilai kepada pelaku rantai; konvergensi kepentingan	Memberikan nilai kepada pelaku rantai; konvergensi kepentingan

Sumber: Thomé dkk. (2021)

Dengan evolusi FSC, terdapat desain ulang dan reposisi rantai pasok serta pelakunya. Dalam hal ini, konsep baru telah muncul, seperti rantai pasok berkelanjutan dan rantai pasok hijau, tanpa mengganggu karakteristik utama FSC. Evolusi seperti itu juga terjadi di SFSC dan dapat dibaca dalam model konsep SFSC yang diperluas, yang diusulkan oleh Renting dkk. (2003) dan diterapkan dalam kasus empiris oleh Oglethorpe & Heron (2013). Mereka mengidentifikasi hambatan rantai pasok yang terjadi dalam rantai pasok pangan lokal berdasarkan produsen yang lebih kecil ketika mereka berusaha untuk meningkatkan penetrasi pasar di wilayah geografis yang lebih luas.

Terlihat bahwa ada kesamaan konseptual tertentu dari SFSC dan FSC dari perspektif teritorial dan geografis. Dalam waktu tertentu, mereka cenderung mengambil fungsi koordinatif, menjadi kooperatif dan tumpang-tindih, tergantung pada kepentingan yang terlibat, peluang dan ancaman pasar, serta kebutuhan akan nilai yang mungkin dimiliki oleh rantai tersebut. Kombinasi nilai tambah dan konvergensi kepentingan dengan faktor-faktor yang saling berinteraksi hadir, baik di SFSC maupun FSC.

Penggerak yang mengarah pada pengembangan SFSC juga membentuk kembali FSC konvensional, yaitu keberlanjutan. Ada pergeseran dalam literatur dari mengonseptualisasikan pembentukan rantai dan jaringan global sebagai area ketidaksetaraan dalam kondisi globalisasi, menuju visi baru tentang potensi rantai sebagai instrumen untuk reformasi sosial dan lingkungan.

Refleksi kolektif mengarah pada pendekatan keberlanjutan untuk mengurangi dampak negatif di sepanjang rantai, seperti melestarikan sumber daya alam, dengan *'No Deforestation, No Peat, No Exploitation'* (NDPE), kebijakan Moratorium Kedelai, pengelolaan limbah pangan,

serta keamanan dan kualitas pangan, standar keberlanjutan perusahaan, ketertelusuran, dan perdagangan yang adil. Guna menekankan evolusi dalam set atribut, FSC telah mengembangkan pendekatan yang sebagian mirip dengan struktur SFSC.

Konvergensi dan divergensi kepentingan dapat memperkuat atau melemahkan sistem dan ceruk teknologi pertanian pangan. FSC konvensional memperhatikan tuntutan baru konsumen mengenai keberlanjutan, disorot oleh Ilbery dan Maye (2005) sebagai pendorong penciptaan SFSC, mungkin merupakan titik konvergensi kepentingan dan nilai. Konvergensi ini menekankan perlunya perspektif kepentingan yang terintegrasi dalam pendekatan rantai, yaitu mekanisme kualitas dan nilai bagi para pelaku di sepanjang rantai.

Terdapat evolusi set atribut untuk menambah nilai, menyoroti kapasitas organisasi, dan rantai pasok untuk membuat, memperluas, atau memodifikasi basis sumber daya untuk mencapai nilai yang lebih besar (Govindan, 2018). Peningkatan untuk keberlanjutan mengandaikan bahwa produk yang berkelanjutan akan memerlukan nilai yang lebih tinggi, mewakili permintaan yang lebih tinggi dari konsumen, dan pelaku pasar lainnya untuk barang yang berkelanjutan secara lingkungan dan/atau sosial. Pergeseran paradigma ini mengarah pada perspektif simultanitas antarrantai, memunculkan model koeksistensi yang mempertimbangkan kombinasi nilai tambah, dan konvergensi kepentingan. Kerangka konseptual mengidentifikasi empat jenis koeksistensi, yaitu tidak kooperatif, kompetitif, kooperatif, dan koordinatif.

1. Koeksistensi Tidak Kooperatif

Awalnya, koeksistensi yang tidak kooperatif menunjukkan pengurangan pada kedua faktor (konvergensi kepentingan dan nilai tambah) memiliki ciri-ciri, seperti tidak adanya atau sedikit konvergensi tujuan oleh rantai yang mencerminkan perbedaan kepentingan di antara para pelaku rantai. Oleh karena itu, FSC dan SFSC menawarkan produk dan layanan tanpa hubungan di antara mereka.

Berdasarkan perspektif kinerja pasar, koeksistensi ini dapat dipahami sebagai versi yang berbeda dari pasar yang sama, meskipun berpotensi bertentangan, tidak menyiratkan konflik atau bahkan perlunya koordinasi apa pun. Memiliki sedikit kebutuhan untuk menambah nilai pada produk dan layanan mereka, rantai tersebut meski hidup berdampingan secara independen satu sama lain, tetapi relatif tidak memiliki hubungan.

Jenis koeksistensi ini dibenarkan oleh penekanan awal SFSC berdasarkan cara alternatif sebagai pengganti cara konvensional yang menjelaskan perbedaan kepentingan. Perbedaan ini mengakibatkan penataan produk alternatif dalam bentuk hubungan yang berbeda dengan konsumen, kebutuhan yang lebih kecil untuk menambah nilai, dan mempertahankan tidak adanya hubungan antara FSC dan SFSC.

Cara alternatif penyediaan pangan merupakan alternatif berkelanjutan untuk rantai global dalam hal manfaat ekonomi, sosial, dan lingkungan. Sementara itu, FSC memiliki distribusi skala besar produk yang bersumber secara nasional atau global. Rantai pangan pun memiliki alternatif kemampuan untuk menghubungkan pertanian dengan permintaan konsumen lokal.

FSC dicirikan oleh supermarket yang menjual produk pangan standar yang diproduksi secara massal, hasilnya menyoroti fokus SFSC pada produk alternatif, dan menekankan versi berbeda dari pasar yang sama. Di lokasi pegunungan dan adanya kesulitan dalam standarisasi produk, kekhasan produk dan pengetahuan serta keterampilan petani, didukung dan lebih mudah dikomunikasikan ke pasar. Jaringan pangan alternatif mempromosikan barang-barang lokal dan/atau organik yang disebut “barang-barang khusus”. Jaringan pangan alternatif di Meksiko Selatan (SFCS) telah berkembang melalui peningkatan minat konsumen dalam melawan tren pangan yang dominan dan mengamankan akses ke pangan organik dan sehat. Hal ini menanggapi tidak adanya pasar yang menghargai produk khusus lokal.

Mempertimbangkan praktik SFSC yang berkelanjutan, penerapan pertanian organik dianggap sebagai faktor penting bagi SFSC. Selain

sistem pertanian pangan konvensional, produsen SFSC juga mengadopsi sistem produksi organik. Pertanian organik merupakan titik fokus penyebaran dalam bentuk konsumsi alternatif. Sebagai versi berbeda dari pasar yang sama, kriteria informal yang dikoordinasikan dalam SFSC mengarah pada kualitas yang berbeda dari kriteria formal pasar yang berlaku. Terkait dengan pangan organik dan lokal, serta produksi skala kecil tradisional, SFSC tertanam dalam informasi sosial dan spasial yang berfungsi untuk membedakannya dari sistem pertanian pangan konvensional.

Dalam koeksistensi yang tidak kooperatif, SFSC saat ini tetap menjadi ceruk pasar, membangun versi pasar baru, sembari melengkapi saluran pemasaran arus utama, yaitu FSC. Saling melengkapi ini dapat dilihat di pasar yang dilayani, di mana, ketika SFSC memasok permintaan lokal dan FSC berusaha memenuhi permintaan global. FSC konvensional hadir pada saat yang sama dan di ruang yang sama didukung oleh versi pasar lain, yaitu pasar mainstream, seperti supermarket.

Meskipun dianggap sebagai jenis koeksistensi, penting untuk menyoroti beberapa studi yang memperlakukan kedua rantai dan atributnya secara independen, bagian ini dikonsentrasikan pada munculnya SFSC. Fakta ini menyoroti bahwa saat ini rantai tidak terisolasi, tetapi saling terkait dalam beberapa cara, seperti yang dijelaskan di bagian selanjutnya.

2. Koeksistensi Kompetitif

Koeksistensi kompetitif terdiri atas kebutuhan besar untuk menambah nilai dalam rantai dan tingkat perbedaan kepentingan yang tinggi. Dalam koeksistensi ini, rantai adalah pesaing sehingga menampilkan permainan *zero-sum* (keuntungan yang didapat satu pihak atas kekalahan pihak lain), di mana rantai berdesak-desakan untuk posisi pasar yang lebih baik dan lebih banyak konsumen.

Dalam koeksistensi ini, hubungan, teknologi, proses, orang, dan struktur rantai digunakan dalam persaingan melawan komponen rantai lainnya, mengingat perbedaan kepentingan dan kebutuhan

yang kuat untuk menambah nilai. Ini adalah koeksistensi paling ilustratif dalam literatur yang melibatkan munculnya SFSC dan di sinilah penekanan tertinggi dalam polarisasi terjadi. Persaingan terjadi dengan memosisikan titik referensi yang membantu dalam perbandingan untuk menonjolkan keunggulan/kualitas/manfaat dari rantai yang berlawanan dengan yang sudah ada di posisinya.

Kompetisi ini ditekankan dengan menegaskan bahwa SFSC adalah sistem alternatif untuk rantai pasokan besar, dengan fokus pada pangan yang diproduksi dan dijual secara lokal, berusaha untuk mengorientasikan kembali struktur kekuatan ekonomi dalam menanggapi berbagai sistem pangan, masalah terkait tidak terbatas pada kesehatan konsumen, tetapi termasuk dampak lingkungan. Dianggap sebagai versi berbeda dari pasar yang sama, hasilnya menekankan beberapa artikel yang membandingkan kedua rantai, menyoroti dimensi nilai tambah, dan akhirnya, bersaing untuk posisi pasar dan konsumen yang lebih baik.

Sistem pangan global mendorong aktor SFSC untuk bertindak, menghadirkan SFSC sebagai strategi memaksimalkan keuntungan dan alat manajemen risiko bagi petani. Persaingan ini menimbulkan beberapa tantangan bagi SFSC, seperti persaingan pasar ketat yang melibatkan biaya distribusi dan logistik yang tinggi, serta muatan pengiriman yang kecil. Untuk bersaing, dibutuhkan perangkat keterampilan inovatif dan kewirausahaan yang memungkinkan merek mereka dibedakan dari produk konvensional yang ditemukan di pasar arus utama. Melalui kebutuhan ini, atribut yang berbeda dibentuk untuk menambah nilai, seperti pangan lokal dan/atau organik. Dengan diferensiasi atribut yang berusaha menambah nilai ini, FSC dan SFSC akhirnya bersaing di pasar.

Mengevaluasi kontribusi SFSC terhadap pengembangan wilayah di tiga wilayah Quebec, Mundler dan Laughrea (2016) menekankan aspek positif jika dibandingkan rantai konvensional, seperti penciptaan lapangan kerja, pengembangan keterampilan bagi petani, kepuasan kerja, dan penerapan praktik pertanian berkelanjutan. SFSC memberikan premi dengan harga yang relatif tinggi karena

memungkinkan sebagian besar margin untuk didapat, namun jika tidak, akan diambil oleh perantara yang berbeda. Zhang dkk. (2019) juga menekankan harga premi ini, terutama pada pangan tertentu di SFSC. Tasca dkk., (2017) membandingkan dua rantai pasok dan menemukan hampir keseluruhan profil lingkungan mendukung pengiriman langsung pangan organik mentah.

Dalam analisis rantai pasok susu segar tradisional dan mesin jual otomatis, Pereira dkk. (2018) berpendapat bahwa mesin tersebut memiliki dampak yang jauh lebih rendah, mempertahankan bahwa SFSC dapat menghasilkan efek ekonomi, lingkungan, dan sosial yang positif melalui bentuk kedekatan yang diperlukan untuk implementasinya. Pemangku kepentingan sistem pangan lokal menilai SFSC secara umum berkinerja lebih baik daripada rantai pasok pangan global arus utama. Menganalisis perilaku konsumen terhadap SFSC, Giampietri dkk. (2018) menekankan pandangan di antara rantai, kemudian ia mempertimbangkan preferensi dan pembelian pangan di SFSC, bukan pasar konvensional atau FSC.

Koeksistensi ini menampilkan FSC dan SFSC yang menekankan konflik dalam hubungan. Kecenderungan umum untuk mendikotomikan rantai pasok pangan pendek dan panjang ini telah membantu dalam teori pergeseran hubungan produksi-konsumsi. Meskipun bersaing untuk mendapatkan posisi pasar dan konsumen yang lebih baik, saluran pemasaran SFSC tidak dapat dipisahkan dari yang lebih konvensional karena mereka berinteraksi, dan petani memandangnya sebagai pelengkap, serta keduanya sering terlibat secara bersamaan.

3. Koeksistensi Kooperatif

Dalam koeksistensi kooperatif, ada kesamaan kepentingan yang sangat intens, dan rantai memiliki kebutuhan kecil untuk menambah nilai. Koeksistensi ini menampilkan kerja sama, asosiasi, penyebaran *input*, dan proses di sepanjang rantai, serta hubungan kesamaan kepentingan aktor mereka. Tidak ada kekhawatiran tentang komitmen dan investasi bersama di antara komponen rantai berdasarkan kebutuhan yang lebih besar untuk menambah nilai. Kebutuhan kecil untuk menambah

nilai dalam koeksistensi kooperatif dapat dikaitkan dengan produk dan layanan yang mapan di pasar, dan didasarkan pada rantai dengan pangsa pasar yang tinggi. Dalam hal ini organisasi dan rantai bekerja sama untuk mempertahankan *status quo*, yang juga merupakan akibat dari kebutuhan/kelangkaan sumber daya dan pemasok.

Dalam koeksistensi ini, dikotomi antarrantai dipertanyakan, menjadikan mereka terlihat samar. Petani dan pengecer cenderung menggabungkan berbagai jenis rantai daripada berspesialisasi dalam satu rantai. Melalui interaksi ini, beberapa sistem dan ruang pangan hibrida telah muncul, alih-alih dua pendekatan yang unik berlawanan.

Bellante (2017) secara singkat menyebutkan bahwa penggunaan tepung/*input* konvensional diproses oleh produsen roti nontradisional melalui profil dasar produsen SFSC di Chiapas. Sementara itu, melalui produk gandum global, roti merupakan makanan pokok dunia yang dapat dipengaruhi oleh warisan lokal dan diklasifikasikan sebagai produk SFSC.

Vittersø dkk. (2019) menggarisbawahi manfaat ritel skala besar bagi produsen organik di Koperasi Konsumen Norwegia, “kerja sama dengan rantai ritel konvensional karena dengan cara ini pangan organik menjadi lebih mudah diakses dan terjangkau oleh konsumen”. Cerrada-Serra dkk. (2018) juga menekankan gerakan sebaliknya, beberapa produk nonlokal dijual di pasar petani untuk meningkatkan keragaman pasokan.

Hal sebaliknya juga diamati, FSC merangkul hubungan berbagi dengan SFSC. Sadar akan tuntutan konsumen baru, Cerrada-Serra dkk. (2018) mengungkapkan bahwa proses “perubahan” FSC konvensional di dalam wilayah mereka, tampak pada supermarket yang mengintegrasikan beberapa karakteristik SFSC, misalnya lokal dan organik. Restoran juga tertarik pada pasokan produk lokal di wilayah Marche (Paciarotti & Torregiani, 2018). Inisiatif telah muncul untuk memperkuat rantai lahan ke restoran, membangun komitmen khusus antara petani dan koki, seperti yang disorot oleh Givens dan Dunning (2019).

Meskipun petani dapat mengalokasikan semua produksi mereka ke SFSC, sebagian besar petani di daerah pinggiran Kota Pisa menggabungkan SFSC dengan rantai pangan konvensional (Filippini dkk., 2016). Cerrada-Serra dkk. (2018) menyampaikan bahwa peningkatan pengembangan rantai pangan hibrida untuk menangani persyaratan permintaan (yaitu proses hibridisasi dalam sistem alternatif, tetapi juga konvensional), terutama untuk menangani penyediaan ketahanan pangan.

Hibridisasi memiliki keuntungan bagi keberlanjutan usaha tani tersebut, selain juga bermanfaat bagi ketahanan pangan masyarakat. 'Hibriditas' dipahami kembali sebagai solusi untuk masalah koordinasi ekonomi yang ditemukan melalui partisipasi. Malak-Rawlikowska dkk. (2019) mengamati partisipasi dari produsen individu dalam beberapa rantai pendek dan panjang untuk menciptakan campuran rantai pasok. Hal ini mengarah pada kesimpulan bahwa rantai pasok yang berbeda dapat hidup berdampingan di pasar, memberikan pilihan yang mungkin tidak hanya menguntungkan produsen, tetapi juga menciptakan kemungkinan untuk memilih dari penawaran pasar yang kompleks sembari memenuhi harapan konsumen dan keragaman kebutuhan masyarakat.

Koeksistensi ini menekankan keterkaitan SFSC dan FSC dengan berbagai hubungan input, proses, dan pasar. Kesamaan kepentingan terkait kebutuhan/kelangkaan sumber daya dan pemasok, rantai ini ditakdirkan untuk tetap berada di pasar, memenuhi harapan konsumen dan persyaratan permintaan, dan menghasilkan manfaat bagi ketahanan pangan masyarakat.

4. Koeksistensi Koordinatif

Koeksistensi koordinatif terkait dengan kesamaan kepentingan dan tingginya intensitas kebutuhan untuk menambah nilai dalam rantai. Koeksistensi ini ditandai dengan integrasi rantai dan aktor sehingga memungkinkan koeksistensi penuh rantai melalui kerja sama, aksi bersama, integrasi dan interaksi proses, struktur, pengetahuan, teknologi, dan informasi, secara formal dan informal. Komitmen

rantai untuk menambah nilai dapat menjadi hasil dari kepentingan konvergen rantai baru di pasar untuk mencapai ruang yang lebih besar dan membangun dasar kompetitif melalui kolaborasi dan integrasi antarrantai.

Melalui keterkaitan SFSC dan FSC, koeksistensi ini ditandai dengan berbagi praktik dan ide yang menghasilkan pembentukan rantai melalui apropriasi prinsip dari satu rantai ke rantai lainnya. Kebutuhan yang lebih tinggi untuk menambah nilai dalam rantai saat ini, koeksistensi ini adalah yang paling umum dalam literatur meskipun tidak diakui secara eksplisit. Keberlanjutan adalah pendorong utama di kedua rantai untuk menambah nilai, ada atribut SFSC yang sesuai di FSC, dan sebaliknya.

Mengembangkan atribut yang sebagian mirip dengan SFSC, FSC telah menerapkan nilai-nilai serupa melalui keberlanjutan ekonomi, sosial, dan lingkungan. Oleh karena itu, terdapat pergeseran menuju visi baru tentang potensi rantai sebagai alat untuk reformasi sosial dan lingkungan. Pergeseran ini juga diamati dalam rantai pasok pangan bahari yang ditandai dengan konsumsi massal. Seperti yang disoroti oleh Douet (2016), penggerak perubahan hijau, berinteraksi untuk membentuk skema rantai pasok.

FSC harus dipertimbangkan kembali untuk mencapai dan berkontribusi pada pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan. Terlepas dari tekanan yang semakin besar untuk membawa pertimbangan keberlanjutan ke dalam pengaturan tata kelola global, Oosterveer (2015) menyoroti kompleksitas rantai pasok global. Dalam rantai minyak sawit, karakter global produksi dan konsumsi, jumlah aktor yang terlibat, peran, dan bentuk kekuasaan sehingga terbentuk perangkat tata kelola menjadi kompleks.

Untuk mengatasi tantangan ini, terdapat kepentingan kolaborasi rantai pasok agar keberlanjutan berhasil di seluruh rantai. Hal ini menunjukkan bahwa kolaborasi untuk keberlanjutan di berbagai tahapan FSC beragam sesuai dengan tahapan, ukuran, dan kekuatan perusahaan, serta tingkat integrasi vertikal. Larsen dkk. (2018) membahas tentang tata kelola hibrida yang bertujuan untuk me-

negaskan kembali kehadiran negara dan mencari strategi pluralistik yang memobilisasi kekuatan positif dari masyarakat sipil, bisnis, dan pemerintah.

Grimm dkk. (2016) mengusulkan desain dan kerangka kerja rantai pasok yang baru untuk meningkatkan kepatuhan pemasok terhadap standar keberlanjutan perusahaan yaitu dengan aktif mengelola para pelaku melalui penilaian dan kolaborasi. Rohmer dkk. (2019) menyajikan model yang bertujuan untuk mempertahankan tingkat asupan pangan yang cukup sebagai dimensi sosial. Selain itu, juga bersama-sama meminimalkan dampak negatif pada lingkungan (perubahan iklim, penggunaan air, penggunaan lahan, dan penipisan bahan bakar fosil) dan biaya ekonomi.

Ada sembilan faktor penentu keberhasilan yang menjadi ciri SFSC, 1) operasi ramah lingkungan; 2) kekhususan merek wilayah tertentu; 3) hubungan langsung dan etis antara produsen dan konsumen; 4) produksi organik; 5) keamanan pangan dan ketertelusuran; 6) warisan budaya; 7) kesehatan konsumen; 8) identifikasi asal produk; dan 9) karya lokal, kerja sama, dan kebanggaan. Kesembilan faktor ini memungkinkan untuk mengidentifikasi literatur yang menyatakan bahwa atribut ini ditambahkan ke FSC.

Operasi ramah lingkungan diupayakan sehingga kebijakan dibuat untuk melestarikan sumber daya alam, seperti '*No Deforestation, No Peat, No Exploitation*' pada industri kelapa sawit, Moratorium Kedelai, dan Deklarasi Daging Berkelanjutan Tiongkok. Govindan (2018) menekankan bahwa pencapaian konsumsi dan produksi berkelanjutan untuk mengurangi pemborosan pangan di luar pemborosan kemasan. Konsep rantai melingkar muncul kembali menuju praktik bisnis yang lebih berkelanjutan, dalam konteks proses pemulihan nilai.

Atribut lain yang dibahas dalam literatur adalah keamanan pangan dan ketertelusuran. Ge dkk. (2016) mengembangkan model simulasi optimasi hibrida dan menemukan solusi global untuk potensi masalah kontaminasi gandum. Rantai pasok pangan juga telah mengadopsi inovasi dan teknologi yang bertujuan untuk memecahkan masalah ini, seperti *Internet of Things* (IoT) dan *blockchain*. Membantu pengguna,

termasuk konsumen, supervisor, dan pemasok untuk memantau dan mengelola pangan yang dipasok dengan mudah. Dengan demikian, persediaan produk dapat menjadi lebih transparan dan membantu memastikan keamanan pangan. Praktik FSC dapat diubah, termasuk untuk meningkatkan keselamatan dan keamanan produk, memperluas visibilitas dan keterlacakan, meningkatkan manajemen kualitas, mengurangi pemalsuan ilegal, dan meningkatkan manajemen rantai pasok yang berkelanjutan.

Mengenai hubungan etis, transaksi perdagangan yang adil melampaui penjualan komoditas, menciptakan nilai lebih dan menghubungkan produsen dan konsumen. Kesehatan konsumen juga menjadi perhatian FSC, sedangkan strategi rantai global mulai berfokus pada nilai gizi.

Identifikasi asal produk juga ditambahkan ke FSC melalui Indikasi Geografis (IG). Keju *Protected Designation of Origin* (PDO) Parmigiano Reggiano adalah salah satu contohnya, ini menjadi salah satu produk PDO paling representatif dalam tradisi gastronomi Italia yang sudah berlangsung lama, dipasarkan di pasar domestik dan UE, serta di seluruh dunia. Petani dan pengolah menganggap perlindungan IG sebagai Hak Kekayaan Intelektual, menjadi alat untuk diferensiasi produk, peningkatan kualitas produksi, integrasi horizontal dan vertikal, penciptaan pengetahuan, pemberdayaan lokal, serta membangun kepercayaan, tidak hanya di antara aktor rantai pasok, tetapi juga antara otoritas publik. Menjadi tertanam secara teritorial, IG dapat berfungsi sebagai penghubung antara sistem produksi lokal dan pasar global, meningkatkan persaingan dan kualitas.

Melalui atribut ini, dalam koeksistensi koordinatif, upaya untuk memperpendek FSC juga diamati, serta meningkatkan integrasi dan kolaborasi antara aktor yang berbeda. Deppermann dkk. (2018) menyimulasikan pemendekan rantai pasok pakan ternak dalam produksi ternak Eropa menggunakan model sektor pertanian skala besar. Sellitto dkk. (2018) juga berfokus pada memperpendek FSC dari dua produsen susu Italia dan dua produsen susu Brazil untuk bergerak lebih dekat ke konsumen, memberikan produk dengan kualiti

tas dan ketertelusuran tinggi, dan pada saat yang sama, meningkatkan keuntungan.

Berbagi praktik dan ide di FSC juga dimasukkan ke dalam SFSC, seperti dalam *scaling-up*. Ketidakmungkinan membatasi pasar tertentu hanya untuk satu wilayah sehingga Aggestam dkk. (2017) menyarankan model bisnis 'hibrida' yang menggabungkan kemampuan dari produsen besar arus utama dan produsen regional yang lebih kecil untuk muncul. Gruchmann dkk. (2019) menekankan kebutuhan ini, yaitu menyelidiki praktik yang relevan untuk mendapatkan wawasan tentang kemampuan dinamis, mana yang memfasilitasi kemampuan transfer dan penyekalan distribusi pangan lokal di SFSC.

Dengan kombinasi ini, pusat pangan (*food hub*) dihadirkan sebagai pengaturan organisasi inovatif yang mampu menjembatani kesenjangan struktural di pasar pertanian pangan, antara produsen kecil dan konsumen. Teritorialisasi ulang sistem pertanian pangan melalui pembangunan rantai pasok pangan yang berbasis nilai, pusat pangan dapat memainkan peran transformatif dalam perluasan AFC, dan dengan demikian, mencapai tujuan yang lebih luas untuk mengubah sistem pangan. Selain pusat pangan, penggunaan teknologi yang berguna memperluas SFSC, dan mendukung proses rekoneksi sosial-material, terjadi baik di tempat maupun *online*.

Melalui konfigurasi ulang SFSC ini, peran, realitas, dan keyakinan baru mengenai pemasaran, hubungan pelanggan, distribusi, dan kenyamanan, yang membuat peserta cenderung mendukung pengaturan lain, jika mereka lebih siap tersedia. Kesesuaian di kedua sisi ini menunjukkan bahwa tidak hanya FSC yang dikonfigurasi ulang dan menambahkan atribut berkelanjutan baru, tetapi juga SFSC.

Bagian ini telah menggambarkan koeksistensi antara FSC dan SFSC, membangun kerangka konseptual yang disusun berdasarkan dua kriteria utama, 1) kesamaan kepentingan dan 2) kebutuhan untuk menambah nilai. Setelah mengungkapkan bagaimana ciri FSC dan SFSC, dan pada titik mana mereka berpisah dan bertemu, dapat dikatakan bahwa rantai pasok tidak statis, tetapi berkembang dan berubah

dalam ukuran, bentuk, dan konfigurasi. Refleksi kolektif mengarah pada pendekatan keberlanjutan, mengonfigurasi ulang FSC dan SFSC.

Koeksistensi diatur antara perbedaan dan persamaan, kepentingan dan kebutuhan yang lebih besar dan lebih kecil untuk memberikan nilai sehingga menghasilkan kerangka konseptual yang mengungkapkan empat jenis koeksistensi, yaitu 1) kompetitif; 2) koordinatif; 3) kooperatif; dan 4) tidak kooperatif.

Awalnya, dalam kemunculan SFSC, koeksistensi didasarkan pada kemandirian rantai, dilihat sebagai pasokan produk yang berbeda (konvensional, standar vs organik) dan skala (global vs lokal). Dalam literatur, juga bisa ditemukan artikel yang menekankan persaingan rantai dalam hal teknologi, struktur rantai, posisi pasar, dan konsumen.

Model rantai ini, meskipun hidup berdampingan secara independen atau berinteraksi secara kompetitif, bahkan ketika tidak kooperatif, bisa dijelaskan melalui kerangka konseptual ini. Literatur mulai mengenali interaksi ini melalui berbagai *input*, proses, pasar dan hibridisasi rantai, dan mengaburkan polarisasi mereka.

Kebutuhan yang lebih besar untuk menambah nilai dalam rantai saat ini dan kesamaan kepentingan, koeksistensi koordinatif adalah yang paling umum dalam literatur, meskipun tidak secara eksplisit diakui. Keterkaitan rantai mengarah pada plastisitas rantai pasok yang menekankan kemampuan membuat perubahan dengan cepat untuk mengakomodasi perubahan yang signifikan. Hasilnya, menekankan keberlanjutan sebagai perubahan signifikan dalam lingkungan bisnis dan pendorong kerangka koeksistensi.

Dari perspektif berorientasi teoretis pragmatis, bagian ini menunjukkan bahwa SFSC dan FSC dapat dilihat dalam berbagai pengaturan, seperti yang diteorikan oleh Zinn dan Goldsby (2019), yaitu rantai sedang dirancang ulang sesuai dengan kebutuhan untuk beradaptasi dengan perubahan lingkungan dan dalam perspektif pertanian pangan, keberlanjutan adalah pendorong utama. Sementara itu, beberapa koeksistensi mungkin telah mendominasi dalam posisi akademis tertentu, model konseptual yang diusulkan mengungkapkan

bahwa koeksistensi ganda terjadi, secara individu atau bersama, dan tidak ada yang dapat diabaikan atau terlupakan. Dengan demikian, bagian ini menyoroti analisis baru SFSC dan FSC dari titik koeksistensi di antara mereka, menciptakan peluang untuk strategi masa depan dalam rantai pasok dan penelitian.

Pemahaman yang lebih baik tentang koeksistensi diharapkan memiliki implikasi manajerial mengenai strategi yang berbeda dari rantai simultan yang melibatkan pelaku rantai pasok, seperti pemasok dan pengecer. Untuk bisnis, memungkinkan adanya optimalisasi hubungan antara para aktor dalam mencapai dan menyelaraskan keberlanjutan ekonomi, sosial, dan lingkungan. Selain itu, kerangka konseptual koeksistensi yang disajikan dalam bagian ini memungkinkan model bisnis baru dan pembuatan alat tata kelola untuk menilai keberlanjutan dan kinerja struktur rantai pasok yang beragam. Adapun untuk kebijakan, memahami koeksistensi ini memungkinkan perluasan yang menekankan keberlanjutan rantai, memahami realitas para aktor, dan strategi yang diadopsi.

F. Rantai Pasok Pangan dan Teknologi untuk Pertanian Masa Depan

Istilah “Pertanian Pangan 4.0” (Agri-Food 4.0) merupakan analogi dari istilah Industri 4.0, yang berasal dari konsep “*agriculture 4.0*”. Sejak awal mula revolusi industri, saat mesin uap memulai konsep Industri 1.0, kemudian penggunaan listrik meningkatkan konsep menjadi Industri 2.0, penggunaan teknologi menghasilkan tonggak sejarah dalam revolusi industri, dengan memulai konsep Industri 3.0. Oleh karena itu, Industri 4.0 adalah tentang memasukkan dan mengintegrasikan perkembangan terbaru berdasarkan teknologi digital serta proses interoperabilitas di antara mereka. Hal ini memungkinkan perusahaan untuk mengirimkan informasi *real-time* dalam hal perilaku dan kinerja. Dengan demikian, tantangannya adalah untuk mempertahankan struktur jaringan yang kompleks ini secara efisien dan mengatur penggunaan teknologi tersebut, terutama

untuk mengidentifikasi dan memenuhi persyaratan dinamis pemangku kepentingan rantai pasok.

Sektor pertanian, tidak terkecuali, meskipun memiliki beberapa spesialisasi, tergantung dari sektor pertanian itu sendiri. Faktanya, mesin-mesin pertanian mulai menggabungkan kontrol elektronik dan telah memasuki era digital sehingga mampu meningkatkan kinerjanya saat ini. Selain itu, perangkat elektronik, penggunaan sensor, dan *drone* mendukung pengumpulan data beberapa aspek utama pertanian, seperti cuaca, geografis, kondisi hewan dan tanaman, serta seluruh siklus hidup pertanian. Namun, penggunaan metode yang tepat untuk meningkatkan kinerja rantai pasok pertanian masih menjadi tantangan sehingga konsep Industri 4.0 telah berkembang dan disesuaikan dengan pertanian 4.0 untuk menganalisis perilaku dan kinerja pada domain khusus ini (sektor pertanian). Dengan demikian, tanda tanya tentang bagaimana pertanian 4.0 mendukung proses pengambilan keputusan rantai pasok yang lebih baik, atau bagaimana dapat membantu menghemat waktu bagi petani untuk membuat keputusan yang efektif berdasarkan data yang objektif, tetap terbuka.

Pertanian kecil adalah faktor penting untuk mendukung pekerjaan pedesaan dan memberikan kontribusi yang cukup besar untuk pembangunan wilayah. Meskipun mereka selalu dianggap sebagai landasan kegiatan pertanian di Uni Eropa (UE), sektor ini paling sering mengalami efisiensi dan efektivitas yang sangat rendah, kepekaan terhadap cuaca, gangguan pasar, dan faktor eksternal lainnya, seperti hubungan dan komunikasi pemangku kepentingan rantai pasok pertanian yang buruk, terutama di tingkat pengolahan pangan. Bahkan, upaya yang digaungkan FAO, di bawah pendekatan “dari lahan ke garpu”, struktur rantai pasok pertanian juga dapat disebut rantai pasok pertanian pangan karena peristiwa utama yang datang dari produksi pertanian pangan ke aktivitas pengolahan pangan, termasuk perdagangan, saling terkait.

Di seluruh rantai pasokan pertanian pangan, dalam banyak kasus, pengetahuan pertanian yang ditransfer dari generasi ke generasi adalah

yang terpenting dari sudut pandang budaya. Akan tetapi, sering kali itu tidak menjawab kebutuhan rantai pasok pertanian pangan. Selain itu, penggambaran seperti itu juga tidak terjadi antara pertanian sebagai unit ekonomi dan petani yang memproduksi pangan sebagian besar untuk konsumsi sendiri. Namun, tidak ada penggambaran formal tentang apa itu pertanian “kecil” dan/atau “besar” yang diterima secara holistik. Hal itu tergantung pada beberapa faktor, seperti negara, wilayah, politik, dan pangsa pasar di antara banyak lainnya. Meskipun demikian, ada dua kriteria untuk mengklasifikasikan luas lahan, yaitu *output* standar (dalam hal ekonomi) dan luas pertanian yang dimanfaatkan (*utilised agricultural area*), sebagai ukuran alternatif.

Eurostat (2018) memperkirakan bahwa pada tahun 2026, peningkatan 4%–6% dalam penghematan biaya pertanian, serta peningkatan 3% dalam nilai pasar, akan dianggap sebagai penggunaan dan pengembangan pertanian cerdas. Oleh karena itu, “Pertanian 4.0 muncul untuk memberikan teknologi maju kepada petani untuk menjawab tantangan produksi pertanian pangan sehingga dapat mencapai harga yang lebih terjangkau untuk pasar dan biaya minimum bagi petani. Dengan demikian, harapan untuk tahun-tahun mendatang, Pertanian Pangan 4.0 dapat membantu memenuhi tantangan berkelanjutan dengan meningkatkan pendapatan pemangku kepentingan rantai pasok pertanian, serta mengurangi tekanan mereka untuk menangani faktor kompleks dan eksternal yang tidak dapat mereka kendalikan, seperti cuaca, perilaku dan kebijakan pasar, juga mampu bereaksi tepat waktu dengan memvisualisasikan tren kebutuhan saat ini.

1. Pertanian Pangan 4.0 dan Teknologi Mutakhir

Sektor pertanian telah aktif dalam inovasi digital selama beberapa dekade. Terutama kemajuan dalam Pertanian Presisi, pengindraan jauh, robot, sistem informasi manajemen pertanian, dan sistem pendukung keputusan, telah membuka jalan bagi transformasi digital yang luas dalam pertanian dan pangan. Perkembangan terkini, seperti komputasi awan, *Internet of Things*, *big data*, *blockchain*, robotika, dan kecerdasan buatan memungkinkan integrasi jalur pengembangan

yang sejauh ini terisolasi ke dalam sistem yang cerdas dan terhubung. Teknologi tersebut akan memungkinkan pertanian berkembang di sistem terhubung yang digerakkan oleh data, cerdas, gesit, dan otonom. Operasi setiap proses pertanian akan secara otomatis terintegrasi dalam rantai pangan melalui teknologi semantik aktif, hingga ke konsumen akhir. Revolusi industri keempat kini merambah pertanian.

Platform teknologi memungkinkan akses ke pemangku kepentingan yang berbeda dan menyediakan kemampuan penyebaran untuk solusi TI. Solusi ini diekspos oleh penyedia layanan atau dikembangkan oleh teknisi perangkat lunak.

Pengelolaan dan eksploitasi data pertanian adalah simpul utama antara kemampuan transformasi digital dan masalah pertanian. Isu pembahasan utama menyangkut konsolidasi penyimpanan data dengan data terbuka, tata kelola (kebijakan, peraturan daerah, dll.), dan data spesifik domain dari pengguna akhir. Tipologi data sangat kaya (tanah, lokasi, energi, iklim, dampak iklim, dll.) dan volume data terus meningkat dengan integrasi sensor dan platform IoT di bidang pertanian. Upaya rekayasa data, meliputi definisi pola, algoritma klasifikasi, analisis korelasi, dll. Semua teknologi tersebut memberikan kemampuan rekayasa untuk data pertanian. Penerapan teknik ini akan menangani data petani, mengintegrasikan repositori data baru dari penyedia eksternal, mengubah data menjadi pengetahuan, dan membantu sistem pendukung keputusan. Pengaktif transparansi data dengan kebijakan berbagi yang diperlukan akan mempercepat proses penyerapan dan pengeluaran data.

a. Teknologi *Big Data*

Aktivitas riset dan pengembangan di *big data* memberikan hasil yang relevan di beberapa domain aplikasi (seperti kesehatan, pemasaran, maritim, perkotaan, manufaktur, dll.). *The Big Data Value Association* (BDVA) mempromosikan penerapan *big data* di berbagai domain. Proyek Big Data Grapes EU menyediakan solusi semantik data, analitik, integrasi dan eksploitasi, serta kumpulan perangkat lunak untuk pertanian anggur.

Integrasi platform IoT dengan masalah pertanian dapat menambah tantangan, khususnya ketika data disimpan atau digunakan di *cloud*, baik dalam hal interoperabilitas, pemantauan kinerja, maupun yang lainnya. Selain itu, IoT mampu mendukung Robotika dan Kendaraan Berpanduan Otomatis/*Robotics and Automated Guided Vehicles* (AGV). Kegiatan yang menarik adalah perbandingan semua platform IoT yang ada dan fungsionalitas yang diusulkan, dan memetakannya dengan kebutuhan pemangku kepentingan pertanian pangan. Integrasi kemampuan IoT akan mendukung petani dalam memanen sumber data baru untuk menciptakan layanan baru yang berharga.

Integrasi teknologi *Big Data* dalam proyek Agri-Food memainkan peran penting dalam, 1) perluasan data petani untuk menciptakan pengetahuan baru; 2) penciptaan layanan dan proses inovatif oleh penyedia teknologi informasi dan pengembang perangkat lunak serta perluasan dan adaptasi model, dan pola *big data* terkait ICT dan *Factories of the Future* (FoF) untuk pertanian. Ada beberapa *big data repositories* yang menjamin akses dan eksploitasi data Agri-Food saat ini. Sebagai contoh, “Pusat Data Iklim Nasional” (sekitar 2,9 Go per hari); Citra Satelit dan informasi metrologi dari Google dan NASA Earth Exchange; Data tanah, air dan geospasial dari National Resources Conservation Service (AS); The Open Corporates sebagai gudang terbuka perusahaan terbesar di dunia (165 juta perusahaan di seluruh dunia); dll.

b. Teknologi *Internet of Things* (IoT)

Integrasi platform IoT di bidang pertanian menyediakan sumber data tambahan yang menjelaskan fitur pertanian (air, tanah, manusia, hewan, dll) dengan lebih banyak data. Isu terbaru tentang IoT menyoroti penggandaan platform IoT. Perluasan ini menghasilkan kerangka kerja implementasi baru yang menjawab model kebutuhan yang berbeda, jaringan baru dari komponen dan sensor yang heterogen dengan model pemantauan yang berbeda, skema pemrosesan waktu, dan konsumsi energi yang tidak seimbang.

c. Pendekatan Model Pengetahuan

Pengembangan model pengetahuan yang berharga di bidang pertanian bertujuan untuk mengubah penyimpanan data bersama guna menciptakan layanan yang menguntungkan dan mendukung pengambilan keputusan pemangku kepentingan yang berbeda. Topik dalam literatur terbaru membahas pengumpulan dan rekayasa data yang tepat untuk melayani penciptaan pengetahuan model pertanian baru, aplikasi teknologi dalam pertanian, alokasi sumber daya, kerangka penilaian (untuk risiko, definisi kebijakan, dan manajemen mutu), serta kualifikasi model keputusan dan identifikasi parameter keputusan (wilayah, lahan, iklim, tanaman, waktu, proses, dll).

d. Teknik Kecerdasan Buatan

Teknik kecerdasan buatan/*artificial intelligence* (AI) berpotensi memberi kontribusi penting dalam identifikasi model pengetahuan, pembuatan layanan, dan proses pengambilan keputusan sebagai dukungan untuk aplikasi pertanian pangan yang berbeda. AI menawarkan algoritma umum formal untuk akurasi dan evaluasi kinerja serta klasifikasi pola yang memungkinkan pemecahan masalah pengetahuan di bidang pertanian, seperti identifikasi OPT dan metode perawatan yang benar. Selain itu, AI mendukung aplikasi dalam pengembangan teknik pertanian, yaitu alokasi lahan terkait aktivitas yang ditargetkan, analisis dan pengendalian proses irigasi, panduan robot, dll.

e. Pertanian Cerdas

Pertanian cerdas muncul sebagai konsep utama dalam Pertanian Pangan 4.0. Dengan mengintegrasikan pendukung teknologi baru yang didorong oleh paradigma Industri 4.0, pertanian cerdas membahas tujuan pertanian penting, seperti penghematan air, konservasi tanah, membatasi emisi karbon, dan peningkatan produktivitas dengan *doing more with less*. Era pertanian baru bertujuan untuk menyelaraskan berbagi kebijakan dan aturan lokal yang lebih baik untuk meningkatkan praktik dan aplikasi pertanian terbaik. Pertanian

cerdas menawarkan kesempatan kepada petani, penyedia teknologi dan layanan, lembaga tata kelola, dan pemangku kepentingan lainnya yang merasakan dampak, seperti organisasi keuangan, investor, dan pedagang untuk berbagi pengalaman dan keasyikan mereka dalam optimalisasi rantai pasok pertanian terkait erat dengan produksi keberlanjutan.

f. Teknik Pertanian Presisi dan Pengembangan Robot

Topik Pertanian Presisi sudah dicakup oleh panggilan Horizon 2020¹⁵. Analisis hasil proyek yang dirilis dan masalah penelitian terkait, memungkinkan identifikasi teknologi, proses, dan aplikasi baru di bidang pertanian. Model yang relevan diusulkan untuk kegiatan terkait lahan, biji-bijian, dan garapan. Hasil daftar yang relevan mencakup akurasi distribusi panen, pengembangan biaya, dan optimalisasi distribusi.

Dalam proyek pertanian pangan, terdapat perencanaan untuk menggunakan kembali teknologi dan hasil pertanian presisi yang tersedia untuk meningkatkan kualitas proses dan aplikasi petani yang ditargetkan. Hasil integrasi robot di bidang pertanian sudah matang dan sudah diusulkan oleh pemangku kepentingan pertanian pangan. Dengan dukungan pertanian presisi, akan dipastikan kinerja proses pertanian yang terkena dampak bisa meningkat.

Robot pertanian juga dibahas dalam topik pertanian presisi. Penelitian terbaru di bidang ini mencakup adaptasi desain robot untuk sektor pertanian, peningkatan kondisi navigasi melalui kemampuan pengindraan dan lokalisasi tambahan. Selain itu juga untuk pemrosesan gambar *real-time* dan deteksi kamera untuk memaksimalkan kemampuan operasional, serta perilaku robot dan robot kolaboratif. Robot dapat membantu manusia untuk tugas yang sulit atau menggantikan manusia untuk tugas tertentu. Proyek pertanian pangan baru mendanai integrasi Robot Pertanian untuk mendukung aplikasi sejak awal dalam memastikan hasil yang maksimal.

¹⁵ Horizon 2020 adalah instrumen keuangan yang mengimplementasikan *Innovation Union*, inisiatif unggulan Eropa 2020 yang bertujuan mengamankan daya saing global Eropa.

Membangun sistem pertanian yang tangguh dan berkelanjutan adalah konsep utama di balik Pertanian 4.0. Kajian terbaru dalam topik ini mencakup analisis keberlanjutan proses pertanian, kalibrasi aktivitas pertanian (siklus rotasi, kontrol akurasi), pengembangan protokol konservasi, dan penyesuaian strategi pengembangan bisnis.

G. Bagaimana Teknologi Digital Mengubah Rantai Pasok Pangan

Mencapai rantai pasok pertanian pangan yang kuat, tangguh, dan berkelanjutan menjadi sangat kompleks karena mereka menghadapi lebih banyak sumber ketidakpastian dan risiko jika dibandingkan dengan rantai pasok lain. Hal ini akan menimbulkan pertanyaan dan kekhawatiran serius tentang kinerja ekonomi, lingkungan, dan sosial. Beberapa penelitian mengidentifikasi sumber ketidakpastian pertanian (seperti Estes dkk., 2017; Estes dkk., 2018; Mundi dkk., 2019) dan bagaimana memodelkannya.

Dalam Estes dkk. (2018) empat jenis ketidakpastian berbasis tanaman telah diidentifikasi, yaitu Produk (mencakup umur simpan, tingkat kerusakan, kurangnya homogenitas, kualitas pangan, dan keamanan pangan), Proses (hasil panen, waktu tunggu pasokan, kebutuhan sumber daya, dan produksi), Pasar (permintaan dan harga pasar), dan Lingkungan (cuaca, hama dan penyakit, serta peraturan). Manajemen yang buruk dari sumber-sumber ketidakpastian ini dapat berdampak negatif terhadap keselamatan, kualitas, kuantitas, dan pemborosan produk serta sumber daya manusia, teknologi, dan alam. Memang, sektor pertanian pangan adalah salah satu bidang ekonomi dan politik di seluruh dunia, dengan implikasi kunci dalam keberlanjutan untuk menutupi tidak hanya kebutuhan pangan penduduk, berkontribusi pada kemampuan kerja dan pertumbuhan ekonomi mereka, tetapi juga berdampak pada kelestarian lingkungan alam.

Oleh karena itu, rantai pasok pertanian pangan sangat ditekan untuk mengelola sumber ketidakpastian dan risiko ini, yang berevolusi, pastinya dari waktu ke waktu tidak diketahui, tetapi dapat mem-

bahayakan keberlanjutan jenis rantai pasok ini di masa depan. Hal ini diperlukan untuk menjauh dari “bisnis seperti biasa” sehingga mampu mengembangkan solusi baru dan menerapkan teknologi inovatif. Sejalan dengan ini, rantai pasokan digital memungkinkan perusahaan untuk memantau aliran material secara *real-time*. Dengan demikian, perusahaan dapat memetakan potensi risiko dan mengembangkan rencana masa depan untuk menghadapinya. Pendorong utama digitalisasi proses SC biasanya adalah peningkatan fleksibilitas dan kecepatan reaksi sistem industri/logistik serta peningkatan ketahanan dan ketangguhan rantai pasok pertanian.

Dalam konteks ini, data menjadi penting. Data adalah sumber kehidupan bisnis apa pun, tanpa terkecuali agribisnis. Teknologi baru memiliki dampak besar pada pengurangan ketidakpastian karena memungkinkan perolehan data yang tepat secara *real-time*, yang perlakuannya, bersama dengan kapasitas pengambilan keputusan yang otonom dan cerdas akan membantu meningkatkan efisiensi, keberlanjutan, fleksibilitas, kelincahan, dan ketahanan sepanjang rantai pasok dari petani ke konsumen akhir.

Dalam konteks rantai pasok berbasis data, teknologi baru yang tercantum di bagian sebelumnya dan akan dibahas lebih dalam di bab keempat, memberikan dukungan yang berbeda dan saling melengkapi untuk urutan aktivitas dari rantai data, yaitu pengambilan data, penyimpanan, transfer, transformasi, analitik, dan pemasaran. Dukungan setiap teknologi untuk aktivitas rantai data yang berbeda memungkinkan kita untuk membayangkan bahwa potensi sebenarnya dari data berasal dari kombinasi dan integrasi teknologi ini. Memang, masing-masing akan meningkatkan beberapa fungsi dasar rantai pasok pertanian pangan berikut, yaitu pengindraan, pemantauan, kontrol, analisis (kemampuan deskriptif), prediksi (kemampuan prediktif), pengambilan keputusan (kemampuan preskriptif), dan pembelajaran adaptif. Melalui pengindraan, pemantauan, kontrol, dan analisis, deteksi masalah secara dini dan akurat dapat dilakukan dan bahkan memprediksi sebelum terjadi, membuat keputusan yang

lebih baik dan mempelajarinya, serta meningkatkan keberlanjutan dan ketahanan rantai pasok pertanian pangan.

Faktanya, integrasi teknologi memungkinkan manajemen rantai pasok pertanian pangan yang lebih cerdas, mampu menggabungkan beberapa model analisis data independen, penyimpanan data historis, dan aliran data secara *real-time*. Informasi *real-time* dan alat pemrosesan data memberikan peluang baru bagi perusahaan untuk bereaksi lebih cepat terhadap perubahan kondisi dalam rantai pasok. Dengan kecerdasan terpadu ini, manajemen rantai pasok pertanian pangan beralih dari mendukung keputusan menjadi mendelegasikannya. Pada akhirnya, hingga memprediksi keputusan mana yang harus diambil.

Dari semua hal di atas, tidak diragukan lagi bahwa teknologi baru ini mengubah cara sektor pertanian mengatur dan membuat keputusan. Beberapa tantangan dari satu teknologi digital ini muncul sebagai kekuatan dari teknologi yang lain. Hal ini memungkinkan penggunaan suatu teknologi sebagai pelengkap teknologi yang lain. Memang, dalam waktu dekat, potensi penuh data akan bergantung pada kombinasi berbagai teknologi yang meningkatkan rantai pasok pertanian pangan berbasis data yang lebih terinformasi, efisien, aman, berkelanjutan, dan tangguh. Misalnya, IoT dan analisis *big data* dapat mengambil manfaat dari *blockchain* yang menyediakan keamanan data, anonimitas, kepercayaan, dan desentralisasi.

Blockchain mampu bertukar informasi dalam jaringan terdistribusi, sedangkan aplikasi IoT baru akan dikembangkan untuk lingkungan terdistribusi. Di sisi lain, data berharga yang dihasilkan dari IoT dapat memperkaya detail transaksi yang terdaftar di *blockchain*. Pada gilirannya, data akurat yang disediakan oleh teknologi *blockchain* dapat digunakan sebagai *input* untuk aplikasi AI dan untuk merekam *output*-nya. Selain itu, AI dapat meningkatkan IoT dengan mengembangkan aplikasi untuk menganalisis data yang ditangkap oleh sensor secara *real-time* menggunakan algoritma pembelajaran mesin. Pembelajaran mesin dan metode analitik lainnya juga dapat meningkatkan kemampuan prediktif dan preskriptif (pengambilan keputusan) dari analisis *big data*.

Ada konsensus luas tentang perlunya memperkuat penelitian dan inovasi di sektor pertanian pangan, baik dalam hal praktik maupun teknologi, melalui penciptaan produk baru, peningkatan proses, layanan atau integrasi peluang digital. Salah satu tantangan bertahan untuk memanfaatkan potensi penuh data adalah untuk mencapai tidak hanya integrasi teknologi ini, tetapi juga interoperabilitasnya. Keragaman pemangku kepentingan yang mengintegrasikan rantai pasok pertanian pangan dengan minat dan karakteristik yang berbeda, membuat sulit untuk menemukan solusi yang sesuai dengan semua pihak yang terlibat sehingga alat pengambilan keputusan kelompok harus dikembangkan. Apalagi ketika solusi tersebut membutuhkan investasi yang signifikan dan ada pemangku kepentingan, seperti petani kecil dengan anggaran terbatas. Untuk alasan ini, akan menjadi kunci untuk menunjukkan nilai inovasi serta mengumpulkan dan bertukar data. Tantangan lain terletak pada kebutuhan standar data. Standardisasi data hasil akan memberikan kesetaraan bagi semua pemangku kepentingan karena kemungkinan untuk mengakses informasi yang sama dan berpotensi memberikan keuntungan finansial. Data hasil mungkin memberikan pelatihan untuk memastikan ketersediaan keterampilan teknis yang diperlukan dan definisi tindakan pengaturan oleh pemerintah.

Penelitian dapat dibiayai bersama dengan mitra swasta (misalnya perusahaan atau kelompok bisnis), pemerintah (berbagai departemen dan lembaga yang terlibat) atau institusi (misalnya universitas). Pendekatan ini menonjolkan pengaruhnya terhadap dukungan pemerintah dan meningkatkan transfer inovasi ke bisnis. Usaha ini membuka kemungkinan pelatihan personel berkualifikasi tinggi dan generasi baru ilmuwan untuk perusahaan dan pusat penelitian. Stabilitas perjanjian pendanaan dengan pusat, mempromosikan retensi staf yang memenuhi syarat dan memfasilitasi kemitraan dengan industri untuk realisasi proyek penataan. Akses ke pendanaan yang tepat dan kredit pajak penelitian dan pengembangan (R&D) juga merupakan sumber penataan pendanaan bagi industri untuk menyerap risiko keuangan yang dihasilkan oleh kegiatan inovasi. Jenis pembiayaan ini

sangat penting ketika inovasi terjadi langsung di perusahaan, yang sering terjadi dalam pengolahan pangan.

H. Model Baru Rantai Pasok Pertanian Pangan

Daya saing perusahaan pengolahan pangan tergantung pada kapasitas investasi, peningkatan produksi, pengembangan produk baru, dan penerapan proses untuk menonjol dalam persaingan. Selama 30 tahun terakhir, kita telah melihat pengurangan keanekaragaman hayati yang signifikan, FAO memperkirakan bahwa kita akan mengalami pengurangan 70% keanekaragaman hayati di planet kita pada tahun 2050 (FAO, 2018). Aktivitas manusia tampaknya menjadi penyebab utama kerugian ini. Pertanian memiliki banyak kartu di tangan untuk memperlambat proses ini dengan menerapkan praktik perlindungan lingkungan dan mengurangi bahan anorganik yang telah menyebabkan kehancuran banyak hewan dan serangga yang hidup di darat, udara dan air; menciptakan koridor hijau dan tempat perlindungan bagi hewan dan serangga; budi daya spesies tua atau spesies dengan keragaman genetik tinggi, meninggalkan desain tanaman hibrida dan monokultur yang mengarah pada penurunan genetik yang signifikan; dan pengurangan lahan subur diatasi dengan penanaman kembali hutan, padang rumput, dan pagar tanaman.

Daya saing ditujukan pada cara berpikir baru pertanian yang memungkinkan pengoptimalan proses dan penghormatan terhadap alam. Kekurangan tenaga kerja di banyak wilayah mengharuskan perusahaan pengolahan untuk mengotomatisasi dan merobohkan proses pengolahan lama mereka. Selain itu, investasi dalam teknologi baru ini memungkinkan mereka untuk meningkatkan produktivitas dan menyediakan kondisi kerja yang lebih baik. Hal ini diperlukan untuk menarik dan mempertahankan tenaga kerja. Selain itu, untuk memenuhi persyaratan standar kualitas rantai dan pengecer pangan, mereka harus menggunakan sistem manajemen mutu dan ketertelusuran yang baik. Investasi dalam teknologi digital juga mendorong otomatisasi operasi, manajemen data, dan akses ke berbagai alat manajemen baru

(Industri 4.0). Industri ini secara khusus dibutuhkan, seperti yang ditunjukkan pada bagian sebelumnya, untuk penggunaan teknologi digital, yang memungkinkannya untuk mengoptimalkan produksi dan rantai pasok sembari memastikan ketertelusuran pangan dari lebih banyak titik.

Bukan hal baru, saat ini, praktik rantai pasok pertanian, khususnya produk pangan, tengah menjadi sorotan publik. Hal ini disebabkan beberapa faktor, yaitu mempertimbangkan masalah kontaminasi pangan, persyaratan kesehatan konsumen yang baru, persyaratan untuk informasi yang lebih tepat tentang pertanian, pemasaran, dan praktik distribusi untuk membawa produk pertanian ke rak supermarket. Dalam konteks yang sama, industri pertanian hanya bergantung pada tenaga manusia dengan penggunaan peralatan dan mesin mekanik yang terbatas. Selain itu, penerapan teknologi canggih, seperti *embedded computing*, robotika, teknologi nirkabel, *Geographical Positioning System/Geographical Information System (GPS/GIS)*, dan perangkat lunak *Database Management System (DBMS)* dipandang sebagai perkembangan terkini.

Selain itu, meningkatnya kesenjangan antara harapan petani dan kemampuan penyuluhan yang dipimpin pemerintah telah menciptakan peluang bisnis yang besar bagi pihak swasta. Dalam konteks ini, informasi tentang sifat geometris tanaman disediakan oleh teknik berbasis digital, seperti *ultrasound*, teknik fotografi digital, sensor cahaya, gambar radar resolusi tinggi, *computed tomography* sinar-X resolusi tinggi, penglihatan stereo, dan sensor LIDAR; melahirkan aplikasi yang tak terhitung jumlahnya di bidang pertanian. Beberapa pekerjaan penting dalam bidang pertanian yang dapat memperoleh manfaat dari teknik karakterisasi geometri tanaman ini adalah penerapan pestisida, irigasi, pemupukan, dan peningkatan dampak positif pada lingkungan dan ekonomi. Akan tetapi, masih ada kebutuhan untuk menyelesaikan beberapa pertanyaan teknologi dan komersial. Sejalan dengan itu, teknologi pertanian difokuskan pada bagaimana ketertelusuran dapat dilakukan. Pada kenyataannya, industri pangan telah mengembangkan metode ketertelusuran yang efisien untuk

pengelolaan logistik dan gudang, berdasarkan keseimbangan biaya dan manfaat dari tingkat sistem ketertelusuran.

Oleh karena itu, beberapa akademisi saat ini sedang mengkaji metode utama berbasis teknologi rantai pasok pertanian dan contohnya diberikan oleh Ahumada dan Villalobos (2009), yang mengidentifikasi bahwa penggunaan model perencanaan terpadu dalam rantai pasok pertanian masih sangat terbatas, dengan potensi tinggi untuk mengelola produk pertanian pangan yang mudah rusak, terutama untuk menghadapi lingkungan yang kompleks.

Selain itu, Kumar dan Ali (2011) mempelajari implikasi penggunaan TIK di bidang pertanian. Dari temuan penulis, sangat terlihat bahwa masih ada penyebaran informasi dan berbagi pengetahuan dalam pembangunan pertanian tingkat menengah, serta masih diperlukan bukti empiris tentang bagaimana penerapan TIK memungkinkan petani untuk mengambil informasi. Melengkapi ini, Sey dan Fellows (2009) membahas bahwa sebagian besar penelitian saat ini belum menetapkan hubungan yang jelas antara akses publik ke TIK dan perubahan/dampak sosial ekonomi di bidang pertanian. Faktanya, ada kebutuhan bagi para peneliti untuk melampaui bukti anekdotal tentang dampak akses publik hilir pada pengguna akhir. Namun, hal ini juga dibuktikan bahwa masih terbatasnya kemampuan menyampaikan informasi dengan pernyataan definitif tentang dampak yang diharapkan dari pertanian, serta untuk mengidentifikasi dan menghubungkan dampak spesifik dengan penggunaan TIK.

Sistem pangan dapat dianggap sebagai “dendritik” yang menghubungkan R&D, keuangan, *input*, dan *output* rantai pasok. Ini berarti rantai pasok pertama dan “inti” adalah rantai pasok *output*. Rantai pasok “pengumpan” kedua dan hulu adalah rantai pasok *input* pertanian. Rantai pasok ‘pengumpan’ ketiga dan hilir adalah yang memasok *input* ke segmen pasca-pertanian. Rantai pasok “pengumpan sistem” keempat adalah memasok keuangan ke setiap segmen dari setiap rantai dalam sistem dendritik. Rantai pasok ‘pengumpan’ kelima adalah seperangkat aset publik yang luas selain dari lembaga penelitian pertanian. Rangkaian “pengumpan” keenam adalah rantai

pasok R&D, yang memasok teknologi dan inovasi produk. Selain itu, tantangan TIK dalam rantai pasok pertanian masih terbuka.

Sebagian besar perkembangan TIK baru-baru ini, di bidang rantai pasok pangan, menemukan bahwa sebagian besar tantangan teknologi di bidang pertanian terutama mencakup masalah keamanan, kurangnya standar dan interoperabilitas, serta keterbatasan perangkat keras dan perangkat lunak menjadi fokus penelitian saat ini. Oleh karena itu, tantangan dan risiko utama juga terkait dengan metodologi. Ben-Daya dkk. (2019) mengungkapkan bahwa aspek desain terutama diidentifikasi sebagai masalah teknologi, sementara abai pada tantangan sosial dan politik.

Proyek perusahaan pengolahan pangan harus mendapat manfaat dari dukungan keuangan yang disediakan pemerintah untuk semua sektor manufaktur. Untuk lebih merangsang investasi, khususnya UKM dan sektor inovatif dari alat keuangan mengingat kebutuhan sektor pengolahan sangat menentukan pengembangan pelaksanaan proyek pembangunan.

Dalam lingkungan bisnis yang dicirikan oleh inovasi teknologi, konsolidasi industri, deregulasi dan permintaan konsumen dalam evolusi yang konstan, pendekatan manajer tradisional tidak lagi memungkinkan perusahaan untuk tetap menghasilkan keuntungan. Oleh karena itu, mereka dipaksa untuk menemukan cara baru untuk tetap kompetitif dalam domain pertanian pangan, seperti yang terjadi pada semua sektor industri lainnya. Dalam domain manajemen, rantai nilai/*value chain management* (VCM), pengambilan keputusan yang diinformasikan untuk menyatukan sumber daya guna meningkatkan daya saing, terbukti menjadi pendekatan strategis kuat yang memungkinkan organisasi untuk beradaptasi dengan lingkungan bisnis secara penuh.

Konsep pengamatan terus-menerus menghasilkan peningkatan desain dan kinerja sistem yang berkelanjutan dan signifikan. Kondisi ini hanya mungkin ketika perusahaan mampu membangun tingkat koordinasi dan integrasi dengan pemasok dan pelanggannya karena tidak mungkin dilakukan melalui hubungan biasa berdasarkan pendekatan

transaksional pembeli-penjual (Sparling, 2007). Hubungan strategis yang lebih dekat dengan pelanggan dan pemasok memungkinkan perusahaan untuk belajar dan beradaptasi dengan lebih baik. Beberapa perusahaan yang menciptakan dan bekerja sama untuk tujuan yang sama menggunakan proses terintegrasi sehingga dapat meningkatkan kinerja mereka dengan cara yang jauh lebih signifikan daripada jika mereka melakukannya sendiri. Co-inovasi memungkinkan perusahaan untuk meningkatkan praktik mereka sendiri dan praktik bersama. Hal ini adalah proses yang memberi perusahaan kekuatan kompetitif yang sulit ditandingi oleh orang lain.

Dari ulasan dan analisis ini, jelas terungkap bahwa integrasi lintas teknologi baru memungkinkan pertanian cerdas untuk mencapai tujuan pertanian penting, seperti penghematan air, konservasi tanah, membatasi emisi karbon, dan peningkatan produktivitas. Faktanya, teknologi baru memiliki dampak positif dan pada saat yang sama, menimbulkan tantangan baru dalam pengelolaan berbagai domain pengetahuan manusia. Oleh karena itu, dampak dan tantangan dua pilar konseptual utama yang muncul dari penggunaan berbagai teknologi di dunia, dalam konsepsi baru pertanian, menjadi aspek fundamental dalam Pertanian Pangan 4.0. Bab ini berfokus pada model industri pertanian yang dikeluarkan dari gaya “barat”. Gaya tersebut pada Pertanian Pangan 4.0 mulai diterapkan dan divalidasi. Fokusnya lebih terspesialisasi pada industri pertanian meskipun Pertanian Pangan 4.0 mulai disesuaikan juga dengan paradigma organik dan *silvo-pasture*.

Bab selanjutnya memberikan perhatian khusus pada teknologi-teknologi utama, yaitu *internet of things*, *blockchain*, *big data* dan kecerdasan buatan, kemasan cerdas, teknologi anti pemalsuan, *drone*, robotika dan sistem otonom, serta printer pangan 3D. Untuk setiap teknologi tersebut disajikan beberapa jenis dampak, yaitu fungsional, ekonomi, lingkungan, sosial, terkait dengan bisnis dan teknologi, serta tantangan yang ditimbulkan seiring dengan penggunaan mereka. Literatur tersegmentasi dalam kaitannya dengan fungsionalitas teknologi tertentu dan pandangan yang luas memberikan kemungkinan untuk

lebih memahami jalan yang dibutuhkan untuk menghadapi tantangan baru.

Masa depan pertanian adalah terciptanya sistem pertanian yang tangguh dan berkelanjutan. Ketidakpastian berbasis tanaman yang telah diidentifikasi ada empat jenis, yaitu Produk, Proses, Pasar, dan Lingkungan, dengan inti masalah adalah manajemen. Manajemen yang buruk dari sumber-sumber ketidakpastian ini berdampak negatif pada keselamatan, kualitas, kuantitas, pemborosan produk serta sumber daya manusia, teknologi, dan alam. Hari ini, dan selalu lebih di masa depan, data adalah sumber kehidupan bisnis apa pun dan tanpa terkecuali menjadi referensi bagi agrobisnis.

Seperti yang disebutkan di bagian sebelumnya, teknologi baru memiliki dampak besar pada pengurangan ketidakpastian karena mereka membuka kemungkinan cara memperoleh data yang tepat secara *real-time*. Selain itu, alat informasi *real-time* memberikan peluang baru bagi perusahaan untuk bereaksi lebih cepat terhadap perubahan kondisi dalam rantai pasok. Kepentingan kita di masa depan adalah menggunakan metode formal untuk mengekstrak pengetahuan dari keterkaitan perbedaan dampak teknologi dan dari solusi yang ada, hingga tantangan yang disorot untuk meningkatkan efisiensi, keberlanjutan, fleksibilitas, kelincahan, dan ketahanan di sepanjang rantai pasok dari petani hingga konsumen akhir.

Secara umum, potensi penerapan teknologi 4.0 pada manajemen rantai pasok pangan dan bagaimana teknologi ini bisa merevolusi pasokan pangan telah dibahas. Teknologi 4.0 terdiri atas berbagai teknologi digital yang mampu diterapkan untuk merevolusi industri dan pasokan pangan. Bab-bab selanjutnya akan lebih berfokus pada setiap teknologi yang bisa diterapkan dalam bidang rantai pasok pangan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB 4

Internet of Things (IoT) dalam Rantai Pasok Pangan

A. Menjaga Kualitas dan Ketertelusuran Pangan

Disrupsi digital telah menjadi hal yang biasa. Konvergensi sistem informasi menjadi lebih rumit dan dinamis, yang mendorong organisasi industri untuk berinvestasi pada manufaktur cerdas. Sangat penting bagi organisasi untuk merangkul teknologi yang berubah untuk mengatasi siklus hidup produk yang lebih pendek dan perubahan lingkungan yang cepat. Sistem Informasi (SI) mencoba mengintegrasikan komunikasi antara manusia dan teknologi. Sebuah SI, termasuk sistem *Enterprise Resource Planning* (ERP), memberikan pengalaman pengguna tanpa batas secara *real-time* yang sangat intuitif untuk mengambil keputusan dan dukungan yang tepat untuk mengelola keseluruhan operasi organisasi secara efektif.

Manajemen rantai pasok merupakan bagian integral dari ERP, yang terhubung dengan berbagai mitra dalam rantai pasok. Rantai pasok terdiri dari pemasok, produsen, grosir, pengecer dan konsumen

akhir dan bermaksud untuk menyinkronkan permintaan dan penawaran. Proses penciptaan nilai yang terkoordinasi dari pembelian bahan mentah hingga penggunaan konsumen akhir dapat dilakukan secara efektif melalui ERP. Manfaat sistem informasi adalah peningkatan efisiensi, peningkatan produktivitas, pengurangan waktu, pengurangan biaya, nol kesalahan, dan inventaris yang dioptimalkan.

Globalisasi dalam skenario saat ini dihadapkan pada pertumbuhan permintaan global yang konstan dalam barang modal dan konsumen dengan terus-menerus memverifikasi kepentingan keseluruhan untuk aspek sosial, lingkungan, dan ekonomi. Untuk mengatasi tantangan ini, rantai pasok industri harus dilengkapi untuk menopang dan saat ini, penciptaan nilai rantai pasok dibentuk oleh kemajuan Industri 4.0. Dalam lingkungan rantai pasok yang dinamis dan berubah, organisasi menghadapi banyak tantangan di ruang manufaktur, seperti daya saing global, kurangnya kemampuan beradaptasi, dan waktu pergi ke pasar seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.1.

Di masa lalu, sebagian besar proses manufaktur dikembangkan dengan tujuan kelayakan ekonomi untuk mencapai produktivitas yang lebih tinggi. Selain itu, kebijakan globalisasi menghilangkan pembatasan batas-batas pasar. Produsen skala kecil dan menengah merasa sulit untuk bersaing dengan produsen besar global karena

Daya Saing Global	Kurangnya Kemampuan Adaptasi	Waktu Pergi ke Pasar
<ul style="list-style-type: none"> • Kebijakan globalisasi menghilangkan pembatasan batas-batas pasar 	<ul style="list-style-type: none"> • Kemampuan untuk memproses bahan yang sulit, pemanfaatan ruang yang lebih sedikit, konsumsi energi yang lebih rendah, bahan beracun. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perkiraan permintaan vs perencanaan pasokan yang tidak tepat, <i>lead time</i> manufaktur yang lama kurangnya peningkatan teknologi.

Sumber: Arif-Uz-Zaman dan Ahsan (2014)

Gambar 4.1 Tantangan Utama bagi Organisasi Rantai Pasok

mereka tidak dapat beradaptasi dalam teknologi yang lebih baru untuk memproses bahan yang sulit, mengoptimalkan pemanfaatan ruang dan mengonsumsi lebih sedikit energi. Tantangan lain adalah memperkenalkan produk baru dan membuatnya tersedia bagi konsumen pada waktu yang tepat.

Tantangan umum yang dihadapi oleh produsen adalah memetakan permintaan yang tepat versus penawaran dan mengurangi waktu tunggu manufaktur. Akibatnya menjadi tak terelakkan bagi mereka untuk melengkapi sumber daya yang tepat dan proses bersama dengan penggunaan teknologi untuk menghasilkan produk revolusioner dan layanan kelas dunia. Faktor-faktor yang memengaruhi ketidakpastian dalam manajemen rantai pasok adalah persaingan global, kurangnya kemampuan beradaptasi, dan keterlambatan masuk ke pasar. Teknologi IoT dinilai mampu mengatasi tantangan ini, yang secara signifikan mengubah industri rantai pasok. Misalnya teknologi ini dapat dimanfaatkan untuk melacak lokasi pengiriman, kecepatan kendaraan, dan konsumen bisa mendapat pemberitahuan akan pengiriman yang terlambat. Teknologi IoT dapat digunakan untuk memantau kondisi peralatan dari lokasi yang jauh. Produk sensitif suhu dapat dipantau dengan sensor dan data dapat dikomunikasikan melalui internet. Sebagai contoh, produk yang mudah rusak terbuang selama transit. Pertemuan internet, nirkabel, analisis prediktif, dan teknologi *cloud* dapat mengubah seluruh operasi rantai pasok dan membawa nilai lebih darinya. Dengan menggunakan IoT, pemborosan ini dapat diminimalisasi karena memantau kondisi produk yang mudah rusak dan mengirimkan statusnya ke pemangku kepentingan rantai pasok.

Meskipun banyak peneliti menganalisis IoT dan SCM secara individual, penerapan IoT di perusahaan untuk memenuhi persyaratan industri 4.0 belum banyak ditinjau dan masih pada tahap awal. Organisasi perlu lebih fokus pada teknologi digital dan mengambil inisiatif untuk memperluas industri 4.0.

Dalam beberapa tahun terakhir, sering terjadi masalah kualitas dan keamanan pangan yang membahayakan kesehatan dan kondisi

masyarakat yang harmonis. Dengan demikian, peningkatan kualitas dan keamanan produk pertanian sangat penting untuk mempercepat perubahan metode peningkatan pertanian dan memastikan keamanan konsumsi penduduk perkotaan dan pedesaan. Tujuan utama dari bagian ini adalah untuk meninjau berbagai aspek SCM, ERP, IoT, dan Industri 4.0, serta mengkaji pentingnya digitalisasi dan peran IoT dalam keseluruhan rantai pasok. Selanjutnya, disampaikan juga kriteria yang dapat dinilai oleh perusahaan untuk mewujudkan kesiapan transformasi industri 4.0.

Bab ini disusun di bawah empat bidang utama, seperti SCM, ERP, Industry 4.0, dan IoT. Ulasan tentang SCM yang penting bagi *Green Supply Chain Management* (GSCM) dan *Sustainable Supply Chain Management* (SSCM) juga dianalisis. Kemudian, pembahasan tentang dampak ERP pada berbagai industri. Selanjutnya, Industri 4.0 diulas secara mendalam untuk mengetahui *building block*, pengaruh teknologi di berbagai industri. Selain itu, IoT dan aplikasinya ditinjau dari perspektif industri dan konsumen. Peran IoT pada SCM pun dianalisis. Berdasarkan analisis tersebut, diusulkan kerangka kerja untuk menilai kesiapan transformasi industri 4.0.

Manajemen rantai pasok mendapat banyak perhatian dari banyak peneliti di dunia saat ini dan menjadi salah satu aspek yang penting. Selain itu, juga menjadi salah satu alat bersaing paling kuat dari produksi, pemrosesan, dan sirkulasi produk pertanian. Seiring dengan perkembangan perdagangan bebas dan internasional, produk pertanian yang berkembang pesat, produk pertanian dari produksi asli hingga perilaku manajemen pengguna akhir menjadi rumit, persyaratan keamanan dan kualitas produk semakin ketat. Dalam hal ini, entitas produksi dan operasi bisnis produk pertanian harus mengatur produksi, memenuhi perubahan kebutuhan yang dipersonalisasi dari hari ke hari, mengurangi biaya operasi logistik, menjamin keamanan dan kualitas produk pertanian, dan harus menyelesaikan masalah ini dengan manajemen rantai pasok yang terdiri dari produsen dan konsumen pertanian. Dari sudut pandang teori logistik, logistik modern, dan teori manajemen rantai pasok memiliki sistem yang relatif sempurna, tetapi sebagian besar teori ini didasarkan pada produk

industri logistik modern dan manajemen rantai pasok. Sementara itu, teori manajemen rantai pasok produk pertanian masih belum menjadi kerangka analisis yang lengkap. Oleh karena itu, bab ini mencoba untuk menerapkan teknologi IoT dalam manajemen rantai pasok, untuk meningkatkan manajemen dan kepuasan konsumen.

B. Tinjauan Umum tentang IoT

Istilah IoT mengacu pada komunikasi yang kuat antara dunia digital dan fisik. Dari sudut pandang ini, IoT menghadirkan hubungan produk dan sensor untuk menawarkan kemampuan baru. IoT diterapkan di berbagai segmen industri termasuk pangan, otomotif, kesehatan, manufaktur, rumah tangga, dan elektronik berteknologi tinggi untuk membuat produk, layanan, dan operasi lebih cerdas.

Sektor teknologi informasi dan komunikasi akan tumbuh triliunan dolar yang menghubungkan 25 miliar aplikasi di mana-mana (Pye, 2014). IoT adalah teknologi baru, yang menawarkan solusi potensial untuk mengubah operasi dan peran industri manufaktur, rantai pasok, dan logistik. Istilah IoT awalnya digunakan untuk menggambarkan perangkat terhubung yang dapat dioperasikan dengan teknologi RFID.

1. Mendefinisikan IoT

IoT dapat diartikulasikan di setiap permukaan kehidupan manusia di seluruh dunia; karenanya IoT dapat didefinisikan sebagai “teknologi intuitif, kuat, dan terukur yang memungkinkan transformasi digital dari dunia yang terhubung melalui internet dan mengomunikasikan semua informasi yang relevan secara *real-time* di seluruh rantai nilai”.

IoT telah berevolusi dari munculnya teknologi nirkabel, sensor, dan internet yang kuat. IoT menghubungkan sistem jaringan dan perangkat lain melalui internet. Sistem mampu mengenali lingkungan dan sangat intuitif dengan bantuan sensor sehingga perangkat mentransmisikan sejumlah besar data setiap hari. Sistem yang terhubung ini mudah digunakan dan dipahami dengan bantuan internet.

2. Perkembangan IoT yang Cepat

Pengaruh IoT meningkat pesat di berbagai organisasi, baik kedirgantaraan, rantai pasok, konstruksi, maupun sektor manufaktur. IoT terlihat layak dan terukur mengingat kemajuan dalam aplikasi internet, komunikasi seluler, kecerdasan adaptif, dan pembelajaran mesin di berbagai sektor, serta berpengaruh signifikan pada sistem perusahaan.

Selama tahun 1980, teknologi RFID digunakan untuk manajemen gudang terutama untuk mengidentifikasi barang dan memantau stok seperti diilustrasikan pada Gambar 4.2. Tahun 1990-an, perangkat nirkabel muncul; Akibatnya, sensor digunakan di berbagai bidang, seperti otomotif, produksi, dan kesehatan. Pada tahun 2000-an, media internet digunakan untuk komunikasi standar dan perlahan-lahan memberikan informasi yang berguna dengan mengakses berbagai sistem di sektor perusahaan. Namun, tantangannya adalah perangkat ini masih perlu interaksi manusia. Sejak tahun 2009 dan seterusnya, IoT mendapatkan momen dan secara drastis mengubah aplikasi industri dan konsumen. Inovasi unik teknologi IoT adalah berbagi informasi



Sumber: Dong dkk. (2017)

Gambar 4.2 Evolusi IoT



Sumber: Wang dkk. (2016)

Gambar 4.3 Bidang Penerapan IoT

secara *real-time* dari lokasi yang jauh. Teknologi ini beroperasi secara dinamis dan bereaksi pada hal-hal bagaimana manusia akan bertindak dalam situasi tersebut.

3. Tren Saat Ini dan Dampak Masa Depan

IoT adalah salah satu kemajuan besar pada era internet digital. Namun, prioritas industri belum disebutkan. IoT memainkan peran penting dalam industri yang berbeda, tetapi untuk membuatnya lebih nyata, akademisi dan praktisi perlu menganalisis dan meneliti lebih lanjut tentang IoT. Akibatnya, informasi yang berasal dari sistem fisik akan meningkat drastis seiring dengan semakin banyaknya peluang bisnis baru yang mulai masuk. Manajemen kepercayaan penting dalam IoT untuk keamanan data, privasi pengguna, dan keamanan siber. Keberhasilan teknologi ini tergantung pada konsistensi dan skalabilitas. IoT menyediakan interoperabilitas, ketergantungan, kepercayaan, dan operasi yang efektif dalam skala internasional. Setiap sektor tidak sepenuhnya independen karena beberapa aplikasi saling menguntungkan, misalnya pelacakan konsinyasi menggunakan aplikasi yang terkait dengan lokasi kerja, pabrik, dan kendaraan.

Salah satu perkembangan IoT yang signifikan adalah penerimaan oleh banyak industri dan konsumen yang tersebar luas, karena jika tidak, teknologi ini mungkin tidak dapat diterima oleh masyarakat. Pada bagian ini, berbagai aplikasi IoT dibahas terkait nilai tambah yang dibawa ke industri dan masyarakat. Beberapa aplikasi seperti *Health Monitoring Wearables* dan perangkat manajemen penyakit yang diaktifkan oleh IoT menghasilkan informasi yang kaya dan mengirimkan data kesehatan fisik. Berbagai peralatan di rumah dapat dikelola secara efisien dan nyaman menggunakan sistem kontrol cerdas yang memanfaatkan teknologi IoT. Sistem kontrol cerdas, seperti pengendali rumah dan sistem keamanan pemantau peralatan, keamanan rumah, dan konsumsi listrik. Dengan menggunakan perangkat IoT, seperti pengendali manajemen energi dan sistem keamanan industri, konsumsi energi gedung perkantoran dapat dipantau dan metode hemat energi juga direkomendasikan.

IoT merangsang pertumbuhan otomatisasi sehingga operasi reguler dapat diotomatisasi di pabrik. Selain itu, produksi industri dapat mencapai tingkat lebih tinggi dengan memanfaatkan mesin ke tingkat optimal dengan memanfaatkan IoT. Beberapa contohnya adalah pabrik pintar dengan beban kerja optimal dan penjadwal kapasitas, pengontrol untuk mengotomatisasi operasi reguler. Dengan mempertimbangkan keselamatan pekerja, sistem pemantauan kesehatan dan perawatan prediktif pada mesin dapat diterapkan di industri pertambangan.

Fokus pada sistem IoT perkotaan diharapkan dapat mendukung kota pintar yang berkelanjutan. Sistem parkir mobil berbasis IoT, sistem pemantauan dan kontrol lalu lintas, manajemen sumber daya adalah beberapa aplikasi untuk membuat kota pintar yang sukses. Investasi pada IoT dari sudut pandang industri telah meningkat secara signifikan. Istilah IoT telah menjadi sorotan utama dalam industri karena banyak organisasi mencoba memprioritaskan tujuan mereka untuk membuat industri menjadi digital. Bagian selanjutnya berfokus pada aplikasi IoT di berbagai industri.

4. Aplikasi IoT–Meningkat dengan Aplikasi Sangat Luas

Pada dasarnya, esensi IoT adalah menghubungkan objek fisik dan digital dengan bantuan internet dan sistem informasi. IoT muncul ke berbagai sektor mengingat kemampuannya untuk memantau secara mandiri dan mengambil keputusan yang tepat. Terlepas dari area aplikasi, IoT menghadirkan sistem industri yang canggih dan fleksibel, yang membantu organisasi di seluruh dunia. Berdasarkan literatur, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3, penerapan IoT dapat diklasifikasikan ke dalam berbagai sektor, seperti pabrik/ Industri, kendaraan, rumah, lokasi kerja, kota, dan kantor. Gambar 4.3 menunjukkan bahwa IoT pada aplikasi manusia, pabrik dan rumah adalah bidang yang paling banyak dipelajari oleh para peneliti.

Tabel 4.1 Implementasi IoT di Berbagai Industri

No.	Industri	Deskripsi
1.	Pertambangan	Perangkat IoT memprediksi situasi tidak aman di tambang dan mengirimkan peringatan kepada pemangku kepentingan dan pekerja sebelum situasi tak terduga terjadi. Hal ini memungkinkan tim untuk bertindak secara proaktif dan menyelamatkan nyawa, biaya, dan waktu (Xu dkk., 2014).
2.	Logistik	Produk pintar saling berhubungan dengan perangkat IoT. Organisasi logistik melacak objek fisik secara <i>real-time</i> dan memastikan bahwa mitra SC diinformasikan dengan waktu ketersediaan barang yang realistis (Zhang dkk., 2012).
3.	Rantai Pasok Pangan	Dinamika industri makanan dibatasi oleh waktu karena berkaitan dengan barang-barang yang mudah rusak. Kualitas barang perlu dilacak dari lahan pertanian sampai konsumen . Ada beberapa proses yang terjadi dan nilai tambah dalam setiap proses. IoT menjawab tantangan yang dihadapi dalam industri pengolahan makanan; itu melacak, memperkirakan umur simpan <i>item</i> dan memperkirakan kedaluwarsa <i>item</i> secara <i>real-time</i> (Doinea dkk., 2015).

No.	Industri	Deskripsi
4.	Kesehatan	Beberapa perangkat IoT telah masuk ke pasar dari perspektif kesehatan. Kondisi manusia dipantau secara <i>real-time</i> secara virtual dari mana saja. Sistem informasi yang canggih juga membantu pada keadaan darurat untuk mengingatkan dan melayani orang yang membutuhkan obat-obatan dan peralatan yang diperlukan secara terus-menerus (Pang, 2013).
5.	Manajemen tanggap darurat	IoT muncul dan memberikan keuntungan dalam operasi manajemen tanggap darurat untuk melacak informasi dan bertindak segera untuk mengambil keputusan cepat karena waktu adalah faktor penting (Yang dkk., 2013).
6.	Rumah sakit	Pengelolaan peralatan kesehatan merupakan tugas penting departemen administrasi karena kadang-kadang menjadi kritis. IoT adalah solusi yang layak dan ekonomis pada manajemen rantai pasokan rumah sakit, karena membantu dalam memprediksi waktu perawatan peralatan, secara otomatis menginformasikan pemangku kepentingan untuk mengambil tindakan segera (Peng dkk., 2017).
7.	Rumah tangga	Dari sudut pandang sosial, adopsi IoT dan dampaknya terhadap masyarakat terutama untuk rumah tangga dan penghuninya mulai diselidiki (Olsson dkk., 2016).
8.	E-retailers	Untuk <i>e-retailer</i> , IoT membantu dalam memberikan produk tepat waktu dan efisien kepada pelanggan. Selain itu, IoT mendorong fleksibilitas dan membawa hubungan yang sehat antara penyedia logistik dan pengecer yang menghasilkan pengiriman produk tepat waktu, yang pada akhirnya memuaskan pelanggan (Jie dkk., 2015).
9.	Pemadam kebakaran	Perangkat IoT mendeteksi kemungkinan kebakaran dan mengirimkan peringatan dini dengan menyampaikan alarm otomatis ke tim penanganan bencana. Teknologi ini membuktikan nilainya selama keadaan darurat (Rosas dkk., 2017).

No.	Industri	Deskripsi
10.	Manajemen gudang	Perangkat IoT memungkinkan supervisor untuk melacak lokasi komponen dari lokasi yang jauh. Ini membantu untuk memberikan instruksi langsung kepada pekerja untuk menangani peralatan khusus dan bahan sensitif. Perangkat sandangan meningkatkan produktivitas dan mempercepat pengiriman. Selain itu, ini memberikan visibilitas yang akurat tentang ketersediaan stok di gudang dan memberi tahu manajer gudang secara otomatis (Reaidy dkk., 2015).
11.	Manajemen energi	IoT membantu organisasi menghemat biaya dengan mengurangi pemborosan energi. Kecerdasan IoT adalah kemampuan untuk mendapatkan data waktu nyata, yang akan membantu menghadirkan pencahayaan cerdas dengan sensor. Manajemen energi di pabrik pintar berbasis IoT adalah model bisnis baru, yang muncul dengan fokus pada keberlanjutan (Shrouf dkk., 2014).
12.	Manufaktur dan logistik	Dengan munculnya IoT, visibilitas <i>real-time</i> pada mesin, komponen, dan status meningkatkan kualitas produk. Demikian pula, IoT memberikan visibilitas ke status objek fisik, yang meningkatkan kualitas layanan. Secara keseluruhan, efektivitas SC meningkat dengan bantuan IoT (Chuang dkk., 2017).
13.	Sistem industri	Saat ini keamanan dan privasi data sensitif dalam sistem IoT industri sangat penting. Aplikasi generasi berikutnya menggunakan sistem fisik siber yang menjanjikan eksplorasi keamanan dan memiliki konektivitas yang kuat dari perangkat tertanam (Tao dkk., 2014).
14.	Konstruksi	Sebagai teknologi konstruksi yang berkelanjutan, prafabrikasi adalah proses yang diadopsi untuk membangun rumah baru untuk mengurangi risiko kekurangan tenaga kerja dan tepat waktu dengan keselamatan dan perlindungan lingkungan. Teknologi digital membantu untuk menghindari kendala dan membangun rumah berbasis prafabrikasi menjadi lebih cepat (Li dkk., 2016).

No.	Industri	Deskripsi
15.	Manajemen energi siklus hidup produk	IoT untuk manajemen energi siklus hidup produk masih dalam tahap awal. Industri mencoba menggunakan IoT untuk mengurangi konsumsi energi (Tao dkk., 2014).
16.	Telekomunikasi	IoT berkelanjutan diprioritaskan dalam industri telekomunikasi agar lebih efisien dan terukur (Zarei dkk., 2016).
17.	Pakaian dan alas kaki	Dengan bantuan industri 4.0 dan IoT yang merangkul ERP, lompatan besar telah terjadi di industri pakaian dan alas kaki untuk meningkatkan kinerja operasional (Majeed & Rupasinghe, 2017).

5. IoT di Bidang Industri: Memperluas Batas

IoT memberikan peluang potensial untuk mengembangkan sistem industri yang kuat dengan teknologi utama, seperti RFID, sensor, dan komunikasi nirkabel. Berbagai aplikasi IoT di industri telah dikomersialkan dan mulai menyebar ke seluruh dunia. Pada bagian ini, tinjauan literatur tentang penelitian IoT saat ini di sektor industri dibahas seperti yang dijelaskan pada Tabel 4.1. Berdasarkan analisis, aplikasi IoT dikembangkan untuk keperluan industri dan konsumen. Namun, fokus pada industri rantai pasok untuk meningkatkan rantai nilai ujung ke ujung belum terfokus. IoT berperan penting dalam meningkatkan efektivitas keseluruhan rantai pasok dengan menyediakan data *real-time*. Selanjutnya, dengan kecerdasan adaptif, pemangku kepentingan akan memperoleh keputusan yang tepat.

6. Muncul Peluang Bisnis Baru dengan IoT

Perusahaan global terus mencari peluang bisnis yang inovatif untuk melayani konsumen dan mengeksplorasi model bisnis baru untuk membuat organisasi semakin untung. Banyak peluang yang ditawarkan oleh IoT untuk dimanfaatkan dalam beberapa bisnis. Berbagai macam aplikasi dapat menggunakan IoT akhir-akhir ini, seperti pabrik pintar dan mobil pintar. Selain itu, IoT digunakan di berbagai sektor, seperti kesehatan, pertahanan, peralatan rumah tangga, dan logistik.

Beberapa model bisnis IoT berhasil eksis saat ini dan tumbuh secara eksponensial dalam hal permintaan dan penawaran. Model bisnis baru muncul dengan pengaruh IoT yang bertindak sebagai platform dan menghubungkan pengguna secara digital dengan bantuan nirkabel dan internet. Di era internet ini bisnis bergeser dari:

- a) Perpustakaan konvensional ke buku daring
- b) Bisnis mulai menggunakan pasar *e-commerce* untuk menemukan barang dan jasa alih-alih direktori fisik
- c) Transformasi cepat terjadi dalam teknologi komunikasi, pengguna berpindah dari data yang direkam dari gawai fisik ke data langsung.
- d) Pengendara mulai berpikir bijak untuk berbagi taksi dengan orang lain daripada taksi individu yang menawarkan lebih banyak manfaat dari segi biaya dan waktu. Ini juga membantu dalam melindungi lingkungan dengan persentase pengurangan jejak karbon yang cukup besar

Semua model bisnis yang disebutkan di atas hanya mungkin karena internet dan perangkat mulai terhubung dengan cerdas dan membantu dunia menjadi tempat tinggal yang lebih baik.

7. Transformasi Digital oleh IoT

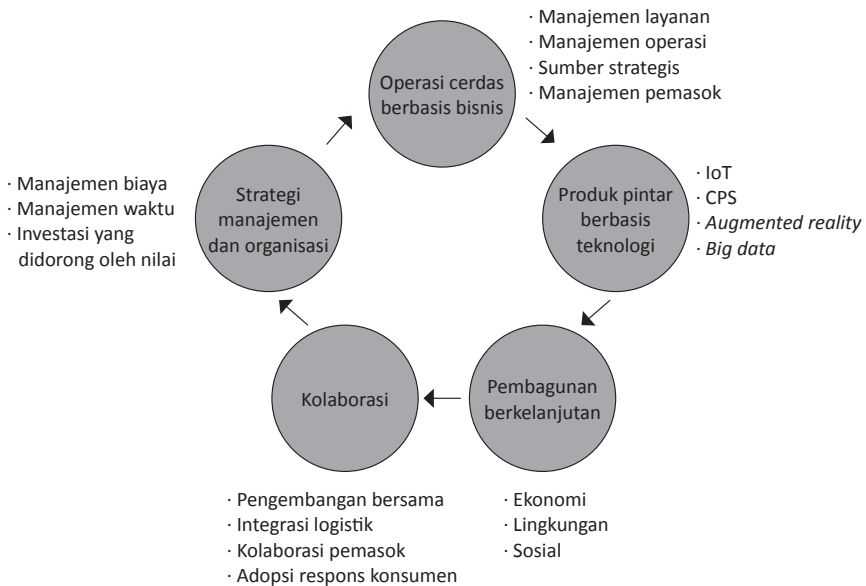
Teknologi IoT memberikan banyak peluang bisnis dengan kecerdasan dalam perangkat, produk, dan layanan. Bagian ini berfokus pada *enabler* IoT, yang membantu bisnis atau masyarakat untuk meningkatkan rantai nilai mereka. *Cloud*, *big data*, dan IoT adalah teknologi tak terpisahkan yang digunakan untuk berbagi data secara *real-time* tanpa jeda kinerja. Literatur telah dipelajari untuk meninjau dampak teknologi pengaktif utama IoT dalam berbagai aplikasi. Daftar teknologi pendukung utama IoT dengan aplikasinya ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Teknologi Pendukung Utama IoT dan Aplikasinya

No.	Teknologi	Aplikasi	Deskripsi
1.	<i>Big data</i>	Sistem manufaktur	Sektor manufaktur mendorong transformasi berikutnya “manufaktur prediktif” dengan bantuan IoT dan CPS, untuk memaksimalkan produktivitas dan mengurangi waktu henti (Wang dkk, 2015).
2.	<i>Cloud</i>	Multipel (Kesehatan, Logistik, Otomotif)	Teknologi, seperti <i>Cloud</i> dan IoT menyatu dengan sistem informasi. Industri 4.0 dapat diterapkan dalam manajemen perawatan kesehatan rumah sakit, logistik, dan industri otomotif (Botta dkk., 2016).
3.	<i>Cloud</i>	Sistem manufaktur	Penerapan teknologi IoT dan <i>Cloud Computing</i> dalam sistem manufaktur memberikan persepsi dan koneksi cerdas dari M2M membentuk <i>Cloud Manufacturing</i> (CMfg). Selain itu, ia berbagi penggunaan sesuai permintaan dan alokasi sumber daya yang optimal dari berbagai kemampuan manufaktur <i>cloud</i> sehingga kerangka kerja CCloudT-CMfg dibuat (Tao dkk., 2014).
4.	IoT berpusat pada <i>Cloud</i>	Pertanian Presisi	IoT dapat digunakan untuk melacak produksi hingga transportasi di industri pertanian. Pemangku kepentingan mendapatkan informasi <i>real-time</i> tentang kondisi inventaris. <i>Cloud</i> membantu mendukung rantai pasok pertanian dengan dukungan IoT (Satpute & Mohanpukar, 2015).
5.	Model perangkat lunak sebagai layanan/ <i>Software-as-a-service model</i> (SaaS)	Sistem logistik	IoT berkomunikasi dengan aplikasi SaaS, pada gilirannya SaaS mengirimkan pesan peringatan <i>real-time</i> kepada para pemangku kepentingan pada industri logistik tentang status barang yang dikirim (Chen dkk., 2014).

No.	Teknologi	Aplikasi	Deskripsi
6.	Pemodelan perusahaan	Manufaktur	Kemunculan <i>Internet of Things</i> (IoT) mendukung sistem perusahaan dalam manufaktur modern yang sebenarnya merupakan sistem kompleks yang terdiri dari data waktu nyata yang dikumpulkan dari mesin, proses, dan lingkungan bisnis. IoT membantu dalam aktivitas pengambilan keputusan yang dinamis (Biddk., 2014).
7.	<i>Big data</i>	Sistem industri	Model implementasi " <i>unique sense</i> " untuk revolusi industri 4.0 dengan <i>big data</i> memegang fokus komputasi cerdas inovatif menuju kustomisasi dinamis, dapat digunakan kembali, ramah lingkungan untuk pengendalian generasi berikutnya dan kekuatan komputasi (Vijaykumar dkk., 2015).
8.	<i>Cloud</i>	Sistem industri	Integrasi teknologi <i>cloud</i> dan sistem <i>cyber-fisik</i> industri/ <i>industrial cyber-physical systems</i> (ICPS) menjadi semakin penting, dalam rantai manufaktur dan layanan bisnis. ICPS akan mempromosikan efisiensi manufaktur, meningkatkan kualitas produksi, dan memungkinkan sistem industri yang berkelanjutan serta bisnis yang lebih ramah lingkungan (Sanislav dkk., 2017).
9.	<i>Big data</i>	Ekonomi berkelanjutan	Kombinasi <i>big data</i> dan IoT meningkatkan penggunaan produk berkelanjutan dan mengurangi pemborosan (Nobre & Tavares, 2017).
10.	<i>Industrial Internet of Things</i> (IIoT) berbasis perangkat lunak	Sistem industri	IIoT dan pendukungnya memberikan lebih banyak fleksibilitas untuk mengelola perangkat fisik (Wan dkk., 2016).

No.	Teknologi	Aplikasi	Deskripsi
11.	<i>Big data</i>	Sistem industri	<i>Big data</i> membantu dalam sistem industri seperti industri pesawat terbang untuk mendapatkan wawasan tentang analitik mengingat banyaknya data yang dihasilkan (Sebastian & Voss, 2015).
12.	<i>Cloud</i>	Kesehatan	IoT memainkan peran penting dalam menghubungkan perangkat medis dan sensor di industri perawatan kesehatan. Untuk menghindari penderitaan yang memberatkan kesehatan pasien, wajib dilakukan pemeriksaan kesehatan secara <i>real-time</i> secara esensial dan krusial (Hossain & Muhammad, 2016).



Sumber: Wang dkk. (2016)

Gambar 4.4 Kerangka Penilaian SSCM untuk Industri 4.0

C. Peluang Penerapan IoT pada *Sustainable Supply Chain (SSC)*

Pengaruh IoT dalam rantai pasok masih pada tahap awal di mana studi menunjukkan bahwa industri rantai pasok harus melangkah untuk mengekstrak manfaat dari teknologi generasi berikutnya. Bagian ini juga mengungkap peluang yang tersedia dengan IoT dan *big data* untuk *sustainable supply chain*. Setiap organisasi rantai pasok yang khas perlu berinvestasi pada teknologi semacam itu untuk menuai keuntungan dalam jangka panjang.

Selanjutnya, praktik rantai pasok yang berkelanjutan mendorong penggunaan energi yang berkelanjutan. Visi Industri 4.0 di SCC adalah seluruh bisnis harus terhubung secara digital; mengurangi jejak karbon dan membantu pemangku kepentingan untuk mengambil keputusan dinamis secara *real-time*. IoT memungkinkan interkoneksi mesin, komponen, perangkat, dan pengguna dalam suatu perusahaan. Selanjutnya, tidak hanya untuk terhubung dengan satu situs manufaktur, dengan memanfaatkan cloud dan internet, seharusnya membuka kemungkinan untuk menghubungkan beberapa situs yang membentuk banyak jalur rantai pasok digital.

Bagian ini membahas berbagai aspek SCM, ERP, IoT, dan Industri 4.0. Telah disampaikan juga pentingnya digitalisasi dan pengaruh IoT di SCM secara keseluruhan. Dengan IoT, para pemangku kepentingan dilengkapi dengan teknologi untuk mengelola sumber daya mereka secara efisien dari jarak jauh. Ulasan menjelaskan juga aplikasi IoT pada manusia, industri/pabrik, dan rumah adalah bidang yang paling banyak dipelajari oleh para peneliti. Industri juga termotivasi untuk membuat produk ramah lingkungan dengan menggunakan bahan baku terbarukan, membangun rantai pasok siklus tertutup dan memulihkan produk di akhir masa pakai untuk mengurangi jejak karbon, serta meningkatkan kinerja ekonomi mereka. Inisiatif ini akan memperkaya tujuan keberlanjutan organisasi mereka.

Beberapa industri telah memulai investasi pada teknologi untuk meningkatkan efisiensi operasional mereka secara keseluruhan

sehingga meningkatkan margin keuntungan. Organisasi dapat terintegrasi secara *real-time* dengan para pemangku kepentingan, seperti pemasok, produsen, pengecer, dan konsumen di lingkungan Industri 4.0. Hal ini menguntungkan seluruh rantai pasok dengan berbagi informasi dalam proses bisnis, membangun solusi inovatif dan munculnya peluang bisnis baru. Kajian ini mengeksplorasi kriteria yang dapat dinilai oleh perusahaan untuk mewujudkan kesiapan transformasi industri 4.0.

Organisasi secara bertahap bergerak menuju penerapan teknologi IoT untuk meningkatkan hasil produksi mereka. Kondisi ini menjamin prospek yang luas untuk mendapatkan keunggulan kompetitif dan mengatur nada untuk praktik rantai pasok berkelanjutan di masa depan. Industri 4.0 menawarkan respons cepat terhadap permintaan konsumen. Dampaknya adalah peningkatan produktivitas dan memungkinkan para pemangku kepentingan untuk membuat keputusan lebih cepat secara *real-time*. Hal ini tentu membuka jalan untuk mengadopsi model bisnis baru dan meningkatkan proses manufaktur.

Dalam ulasan ini, berbagai aspek IoT, SSC, dan industri 4.0 telah dibahas secara rinci. Literatur dianalisis untuk mengetahui tren dan mengeksplorasi potensi peluang IoT yang tersedia di ruang rantai pasok berkelanjutan untuk industri 4.0. Berdasarkan pembahasan juga, kerangka kerja baru untuk menilai kesiapan *Supply Chain Management* (SCM) untuk pembangunan berkelanjutan yang memenuhi industri 4.0 telah diusulkan. Model konseptual telah dirumuskan dari lima perspektif SCM, yaitu perspektif bisnis, teknologi, pembangunan berkelanjutan, kolaborasi, dan strategi manajemen. Kerangka kerja yang diberikan dapat menjadi landasan untuk bertransformasi menjadi organisasi industri 4.0. Pada penyelesaian transformasi ini, organisasi akan menjadi perusahaan digital yang lengkap. Perusahaan digital akan beroperasi dengan mitra rantai pasok dalam ekosistem digital organisasi.

Berinvestasi pada teknologi tidak dapat dihindari demi menghasilkan manfaat industri 4.0. Selain itu, transformasi ke industri 4.0 membutuhkan solusi keamanan TI yang tepat, tenaga kerja dengan

keahlian yang dibutuhkan, dan kemampuan berbagi informasi dalam lingkungan yang terintegrasi dengan mitra bisnis. Industri skala kecil mungkin merasa sulit untuk menerapkan industri 4.0 karena mereka kekurangan sumber daya keuangan yang cukup untuk melakukan investasi. Dengan demikian, akan menjadi tantangan bagi industri kecil untuk menerapkan industri 4.0. Kerangka kerja yang diusulkan untuk menilai SSCM bersifat umum untuk semua organisasi. Di masa depan, mungkin ada beberapa tambahan kriteria dalam kerangka penerapan Industri 4.0 khusus industri.

D. Aplikasi *Internet of Things* dalam Manajemen Rantai Pasok Hasil Pertanian

1. Sistem Kontrol Kualitas Produk Pertanian

Selama bertahun-tahun, masalah keamanan pangan sangat memengaruhi kesehatan masyarakat, menyebabkan keprihatinan sosial yang meluas. Cara melacak dan menelusuri pangan secara efektif adalah masalah global yang sangat mendesak. Untuk memastikan kualitas dan keamanan produk pertanian, kita harus mencari informasi sejak dari hulu, menetapkan secara lengkap sistem penelusuran dan pelacakan kualitas, dan menjamin kualitas produk pertanian.

Ketika produk pertanian mengalami masalah, terutama muncul masalah serius yang membahayakan kehidupan dan kesehatan konsumen, dapat diketahui siapa yang harus bertanggung jawab atas insiden itu. Pembentukan dan perbaikan seluruh prosedur sistem kontrol kualitas dan sistem dari lahan ke pasar untuk produk pertanian perlu dibuat. Begitu juga ada urgensi untuk mengawasi dan mengelola lingkungan produksi, proses produksi, pengujian produk, meningkatkan kesadaran keamanan dan tanggung jawab produsen, serta menjamin kualitas produk pertanian.

IoT akan secara efektif memecahkan masalah kualitas dan keamanan produk pertanian. Dari produksi produk mulai tag EPC (*Electronic Product Code*) yang disematkan pada produk sehingga

mampu mencatat seluruh proses produksi dan peredaran produk. Dengan tag EPC, konsumen mendapat informasi tentang seluruh proses pasokan bahan baku, produksi, pemrosesan, dan pemasaran, dan informasi terkait, untuk memutuskan apakah mereka akan membeli atau tidak. Menyelesaikan masalah bahwa informasi komoditas hanya dari produsen, memastikan konsumen dapat memperoleh informasi produk melalui IoT, dan informasi ini tidak ditentukan oleh keinginan produsen.

2. Meningkatkan Manajemen Rantai Pasok Produk Pertanian dan Membangun Platform Baru “Integrasi Tiga Jaringan”

“Integrasi Tiga Jaringan” mengacu pada internet, IoT dan jaringan informasi logistik produk pertanian. Berdasarkan pembangunan dan integrasi tiga jaringan, dibangunlah platform baru manajemen rantai pasok pertanian. Pada platform manajemen rantai pasok “Integrasi Tiga Jaringan”, setiap jaringan melakukan fungsi yang berbeda dan juga bergantung pada sumber daya yang berbeda. Pertama, internet, yang bergantung pada bentuk baru sumber daya teknis, melalui konstruksi replikatif globalnya, dapat membangun platform teknis di era informasi. Kedua, rantai pasok mencakup lima mata rantai, yaitu pasokan bahan baku, produksi, sirkulasi, pengolahan, dan konsumsi. Melalui IoT, perusahaan dapat memantau setiap jenis produk pertanian secara *real-time* dan mengelola sistem logistik. Tidak hanya dapat mengawasi proses sirkulasi dan berbagi informasi, tetapi juga dapat menganalisis dan memprediksi informasi produk pertanian dalam rantai pasok. Berdasarkan prediksi informasi produk pertanian pada periode saat ini dapat memperkirakan tren masa depan atau tingkat kejadian kecelakaan, mengambil tindakan perbaikan atau peringatan tepat waktu, meningkatkan kualitas manajemen rantai pasok, dan meningkatkan kemampuan untuk merespons pasar dengan cepat.

Akhirnya, realisasi pemanfaatan penuh jaringan informasi logistik produk pertanian digunakan untuk meningkatkan kemampuan penelusuran, peringatan, dan publikasi informasi, serta

membangun kualitas dan keamanan platform informasi manajemen produk pertanian yang komprehensif. Dengan menetapkan kualitas dan keamanan platform informasi ketertelusuran produk pertanian, dan secara bertahap menyadari informasi kualitas produk pertanian dapat ditanyakan, kualitas dan keamanan dapat dilacak, dan produk bermasalah dapat ditarik dari pasar. Ini adalah strategi perusahaan untuk situasi pasar baru yang juga merupakan pembaruan gagasan manajemen logistik pertanian dan untuk tujuan pembangunan jangka panjang dengan menggunakan teknologi tinggi.

E. Mengembangkan Teknologi Logistik Modern dan Meningkatkan Kualitas Manajemen Keselamatan

Dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, teknologi logistik pertanian modern akan mendapatkan pengembangan dan aplikasi yang memadai dan berdasarkan pada “Integrasi Tiga Jaringan”. Teknologi logistik baru berbasis jaringan adalah kunci untuk mewujudkan logistik pertanian tanpa hambatan sehingga dapat melacak tingkat kualitas. Beberapa perusahaan mengembangkan sistem penelusuran teknologi canggih rantai pasok pangan berdasarkan kualitas dan keamanan, seperti petani menggunakan tanda telinga elektronik dan kartu pengumpulan data terkait untuk melacak catatan imunisasi pangan atau produk pertanian, catatan kesehatan, dan meningkatkan catatan. Selain itu, pengembangan teknologi pengambilan cek elektronik, teknologi GIS, teknologi identifikasi otomatis, teknologi GPS, dan teknologi logistik baru lainnya untuk tindak lanjut, memastikan kualitas pertanian dan pangan, dapat secara efektif meningkatkan informasi rantai pasok pertanian saat ini. Oleh karena itu, penting untuk mempercepat konstruksi rantai pasok produk pertanian “Integrasi Tiga Jaringan” dalam mendukung manajemen integrasi rantai pasok *multi-layer* dan multiobjektif. Dengan demikian, integrasi tersebut mampu mengurangi lebih banyak biaya rantai pasok, mempersingkat waktu operasi rantai pasok, membangun sistem integrasi dalam rantai pasok yang efisien, untuk memastikan produk pertanian dapat terus

mengalir ke konsumen, dan meningkatkan seluruh kualitas manajemen dari seluruh rantai pasok.

F. *Internet of Things* untuk Transparansi dan Ketertelusuran Rantai Pasok Pangan

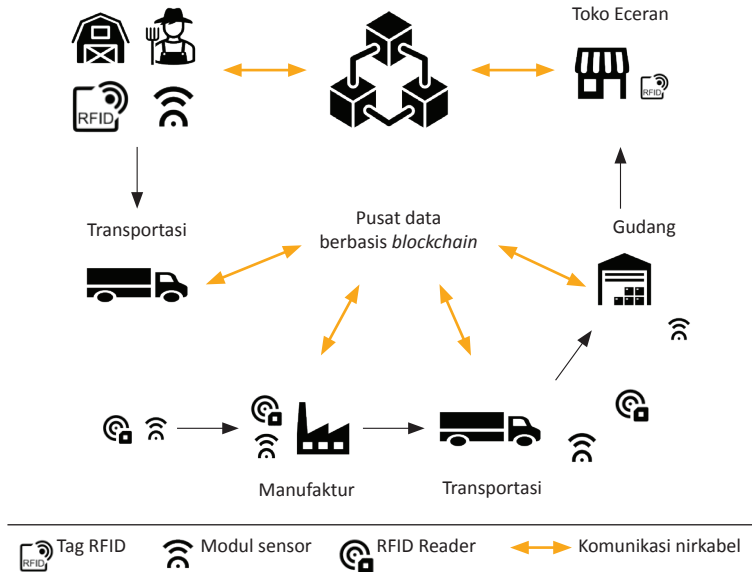
Platform *Internet of Things* (IoT) dapat memberikan informasi asal produk (informasi yang melacak produk ke asalnya) dalam rantai pasok pangan (FSC). Kondisi ini mampu memberdayakan konsumen dengan informasi dan kesempatan untuk membuat keputusan yang paling tepat. Mengintegrasikan teknologi IoT dengan *blockchain* dapat membuat FSC menjadi transparan, menjadikannya lebih produktif dengan memberikan informasi yang dapat dipercaya dan aman, baik kepada konsumen maupun pihak terkait. Bagian ini mengusulkan arsitektur platform IoT yang dikombinasikan dengan *blockchain* untuk menggantikan pihak ketiga yang ada di FSC dan akan mengotorisasi data produk. Platform ini akan memastikan bahwa data produk yang dikumpulkan melalui sensor dari setiap tahap rantai pasok adalah sah dan mematuhi persyaratan yang disepakati oleh semua pihak yang terlibat dalam sistem. Dalam bagian ini disajikan studi kasus untuk mendukung gagasan teknologi IoT yang dapat diakses dan digunakan untuk membuat jaringan data. Platform ini juga merinci teknologi apa yang dapat digunakan dalam platform IoT dan bagaimana mendukung arsitektur yang diusulkan. Secara khusus dijelaskan bahwa *blockchain* dapat digunakan secara bersinggungan dengan teknologi IoT untuk memodernisasi dan mengoptimalkan FSC konvensional.

Seiring dengan pertumbuhan industri transportasi pangan, kebutuhan akan rantai pasok pangan yang lebih efisien, transparan, dan dapat dilacak juga semakin meningkat. Ada tren peningkatan konsumen yang menuntut lebih banyak produk pangan berkualitas tinggi. Hal ini membuat kebutuhan FSC modern semakin kompleks dibandingkan tahun-tahun sebelumnya. Selain kompleksitas, FSC modern juga perlu memenuhi permintaan produk pangan yang dapat dilacak dan aman dijual. Usaha ini mencakup pemberian informasi terkini yang mudah diakses tentang asal, kualitas, dan kuantitas

produk. Konsumen modern jauh lebih sadar akan kualitas produk dan bersedia membeli dari tempat yang dapat membuktikan kualitas produk mereka yang paling meyakinkan. Ada kebutuhan akan solusi praktis berbasis teknologi informasi dan komunikasi (TIK) untuk meningkatkan efektivitas serta keandalan FSC.

Dengan munculnya penemuan dan kemajuan teknologi, perangkat IoT telah menjadi sangat bervariasi dan semakin mudah diakses. Hal ini juga memungkinkan fungsionalitas komputasi canggih dengan cara yang portabel dan terjangkau. Platform IoT untuk FSC dapat menyediakan informasi sumber produk yang memberdayakan konsumen dengan informasi dan kesempatan untuk membuat keputusan yang paling tepat. Lebih lanjut, solusi IoT telah terbukti meningkatkan efisiensi keseluruhan FSC dan secara efektif memantau kualitas produk di dalamnya. Di sisi lain, solusi *blockchain* telah terbukti membangun asal produk pangan yang membuat konsumen mengetahui kondisi manufaktur, transportasi, dan penyimpanan produk yang bersangkutan. Pengetahuan asal yang disediakan oleh *blockchain* dianggap dapat diandalkan karena sulit untuk mengubah informasi yang disimpan dalam basis data terdesentralisasi yang tidak memungkinkan data untuk diubah.

Mengintegrasikan IoT dengan *blockchain* akan merampingkan FSC sehingga lebih efektif. Platform IoT yang mendukung *blockchain* dapat memberikan informasi yang dapat dipercaya dan aman baik kepada konsumen maupun pemangku kepentingan lainnya. Waktu transaksi dapat dikurangi secara signifikan, menyederhanakan rantai pasok sambil memberikan keamanan informasi yang memadai. Ini berarti bahwa platform IoT yang mendukung *blockchain* dapat menyediakan informasi tentang sumber produk yang memberdayakan semua pihak yang terlibat dengan informasi dan peluang untuk membuat keputusan yang paling tepat. Gambar 4.5 menunjukkan ilustrasi platform IoT yang dikombinasikan dengan *blockchain* di mana fase dan pemangku kepentingan yang berbeda terlibat dalam FSC saling berhubungan. Ini menunjukkan jalur khas yang umumnya diambil oleh produk pangan di FSC mulai dari produsen tempat



Sumber: (Haroon dkk., 2019)

Gambar 4.5 IoT dan *Blockchain* untuk Rantai Pasok Pangan

bahan mentah diperoleh. Mereka kemudian diangkut ke fasilitas manufaktur tempat produk dibuat dan dikemas. Kemudian diangkut ke fasilitas penyimpanan seperti gudang sampai dikirim ke toko ritel tempat konsumen akan membelinya. Sementara itu, perangkat IoT mengirimkan informasi produk ke basis data berbasis *blockchain* untuk penyimpanan.

Ilustrasi dalam Gambar 4.5 memungkinkan FSC untuk mengumpulkan dan menyimpan data produk yang akurat dan andal menggunakan solusi IoT. Selain itu, penggunaan IoT membuat informasi aman dan dapat diakses oleh pihak terkait dengan mengintegrasikan dengan teknologi *blockchain*. Konsep ini akan memungkinkan produk pangan memiliki data rinci dan terkini sehingga menjadi bahan pertimbangan konsumen saat membeli. Pada saat yang sama pusat

data dapat diandalkan dan dilindungi dari kemungkinan gangguan oleh berbagai pihak.

1. Sistem FSC Berbasis IoT

Liu dkk. (2017) mengusulkan platform IoT untuk pelacakan dan penelusuran produk. Platform yang diusulkan menyediakan layanan penting dan bermanfaat, seperti memungkinkan perusahaan untuk memantau FSC sehingga mampu membuat keputusan yang relevan dan terinformasi. Demikian pula, infrastruktur terperinci untuk mengimplementasikan platform penginderaan dan komunikasi berbasis IoT di FSC disampaikan oleh Pal & Kant (2018). Para penulis membahas data lingkungan spesifik yang perlu dikumpulkan oleh platform IoT bersama dengan teknologi yang paling cocok untuk tugas yang diterapkan dalam FSC. Para penulis mengusulkan faktor-faktor penting, seperti kandungan bakteri, kontaminasi, dan tekstur atau degradasi warna yang dapat dikumpulkan oleh platform. Penulis juga mengeksplorasi alternatif untuk komunikasi antara semua modul penginderaan dan hub lokal yang menyimpan data. Komunikasi dengan frekuensi radio (RF/*Radio Frequency*) dianggap tidak efektif karena penyerapan sinyal yang ekstensif dan kondisi saluran yang kompleks. Komunikasi ultrasonik juga dianggap tidak cocok karena penyerapan ultrasonik dapat menyebabkan pembentukan panas dalam pangan yang mudah rusak. Alternatif terbaik diputuskan untuk menjadi komunikasi berbasis induksi magnetik yang memanfaatkan kopling induktif resonansi antara dua kumparan yang cocok. Itu tidak terpengaruh oleh media jaringan dan bekerja pada tingkat daya yang lebih rendah daripada RF atau ultrasonik. Manfaat potensial dari sistem ini adalah distribusi cerdas, deteksi kontaminasi, dan optimalisasi kondisi. Meskipun mereka mengusulkan solusi untuk meningkatkan keterlacakan FSC dan membuat keputusan berdasarkan ketertelusuran, mereka belum membahas bagaimana sistem yang mereka tawarkan akan melindungi data yang terkumpul dari gangguan.

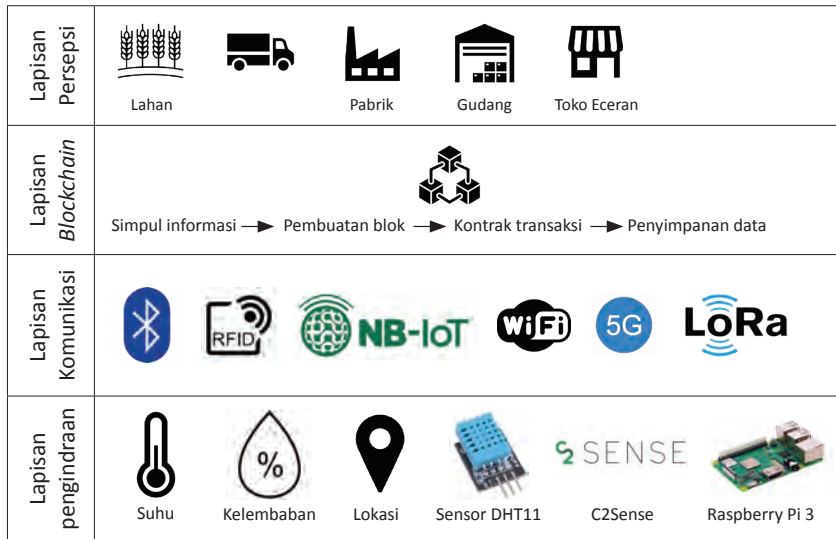
2. Sistem FSC berbasis *Blockchain* dan IoT

Jabbari (2021) membahas sifat sistem *blockchain* dan bagaimana *blockchain* dapat memengaruhi FSC. Beberapa manfaat telah disorot, seperti memastikan kepercayaan antara pengguna dan sistem, menghilangkan kebutuhan pihak ketiga untuk memastikan kepercayaan, dan memungkinkan bahan untuk ditelusuri kembali ke asalnya. Penulis juga percaya bahwa masalah spesifik perlu ditangani sebelum *blockchain* benar-benar dapat merevolusi manajemen FSC. Salah satu masalahnya adalah bahwa teknologi RFID mudah diduplikasi dan sensor dapat dengan mudah dirusak. Masalah lainnya adalah jaringan *blockchain* standar tidak dapat menangani hubungan rumit yang ada di FSC. Terdapat peraturan pemerintah yang harus dipatuhi oleh FSC berbasis *blockchain*, seperti transparansi semua data yang dikumpulkan dan cara bagaimana data dapat ditransfer ke platform peraturan. Beberapa manfaat juga disorot, seperti memastikan kepercayaan pada kualitas pangan. Persyaratan sistem tambahan untuk ketertelusuran keamanan pangan berdasarkan *blockchain* adalah keharusan memiliki data yang ringkas, tidak mengandung informasi perusahaan yang sensitif, dan tahan terhadap kerusakan. Sistem juga harus menjamin keabsahan data yang dikumpulkan, menahan serangan spam, dan menjamin aksesibilitas. Kemampuan untuk menelusuri asal-usul setiap produk dapat dibuat menggunakan FSC berbasis *blockchain*. Hal ini juga dapat mengakibatkan penyeimbangan dari asimetri informasi yang ada (karena sebagian besar informasi produk hanya dapat diakses oleh bisnis dan bukan konsumen). FSC berbasis *blockchain* juga berdampak secara khusus di pasar pertanian. Sistem yang menggunakan *blockchain* perlu menjadi lebih sederhana dan lebih mudah digunakan karena petani kesulitan untuk memahami dan menerapkan sistem ini. Perlunya FSC yang lebih efisien dan efektif sehingga dapat mencegah masalah penarikan pangan yang signifikan karena kontaminasi mikrob, kesalahan pelabelan, bahan yang tidak disetujui, dan faktor lainnya. Aich dkk. (2019) membandingkan integrasi *blockchain* dalam rantai pasok di berbagai industri seperti farmasi, otomotif dan ritel bersama dengan pangan. Perbandingan

menunjukkan peran berbeda yang dimiliki *blockchain* dalam rantai pasok yang berbeda.

G. Arsitektur

Haroon dkk. (2019) mengusulkan arsitektur untuk menggunakan sistem IoT yang dikombinasikan dengan *blockchain* untuk FSC yang terdiri dari empat lapisan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Sumber: Haroon dkk. (2019)

Gambar 4.6 IoT yang Mendukung Blockchain untuk Rantai Pasok Pangan

1. Lapisan Penginderaan

Lapisan FSC ini terdiri dari sensor yang mengumpulkan data penting untuk kualitas dan status setiap produk. Data tentang suhu, kelembapan, dan lokasi paket adalah beberapa faktor terpenting yang perlu diukur dan berfungsi sebagai indikator yang dapat diandalkan untuk kualitas lingkungan paket. Teknologi sensor seperti sensor DHT11 dapat digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan di sekitar

kemasan. Teknologi penginderaan, seperti C2Sense, FoodScan, dan sistem penginderaan Salmonella dapat menunjukkan kualitas produk pangan dengan mengukur faktor-faktor, seperti degradasi warna, tekstur, dan kandungan bakteri. Data sensor kemudian perlu dikumpulkan dan diteruskan ke basis data *online* oleh mikrokontroler seperti Raspberry-Pi. Pada tahap ini, basis data daring akan berisi kumpulan informasi untuk akses selanjutnya.

2. Lapisan Komunikasi

Untuk komunikasi data yang efisien dari *node*¹⁶ sensor IoT ke *cloud*, teknologi komunikasi jarak jauh dan jarak pendek harus tersedia. Misalnya, selama fase transportasi FSC, komunikasi jarak jauh diperlukan agar data sensor ditransmisikan ke satu titik data pusat. Salah satu opsi adalah menggunakan komunikasi seluler untuk mentransfer data ke modul pusat di mana data tersebut dapat dianalisis dan dimasukkan ke dalam jaringan *blockchain*. Salah satu contohnya adalah 3GGP NB-IoT, merupakan jaringan komunikasi jarak jauh yang berpusat pada komunikasi seluler. Pilihan lain adalah menggunakan internet untuk mengirim informasi jarak jauh ke titik akses pusat. Modul SigFox dapat digunakan untuk mengumpulkan data dari sensor IoT dalam jarak dekat dan mentransfer ke *cloud* sehingga data dapat didorong ke server/aplikasi klien. Modul LoRa WAN bekerja dengan cara yang sama, kecuali fakta bahwa LoRa berkomunikasi dengan server pusat secara langsung, bukan *cloud*. Komunikasi jarak pendek akan diperlukan untuk mentransfer data ke modul komunikasi terdekat seperti di dalam truk atau gudang. Teknologi komunikasi jarak pendek konvensional termasuk Bluetooth dan ZigBee. Namun, teknologi-teknologi tersebut dapat menjadi tidak efektif ketika ada banyak kendala karena penyerapan. Komunikasi ultrasonik juga bisa menjadi

¹⁶ Istilah “node” atau simpul sebagian besar digunakan dalam kaitannya dengan *blockchain*, yaitu buku besar digital terdesentralisasi yang mencatat semua transaksi *cryptocurrency* dan membuat informasi tersedia untuk semua orang melalui perangkat yang terhubung. Artinya, setiap transaksi harus dicatat dan didistribusikan secara kronologis ke serangkaian perangkat yang terhubung. Perangkat ini disebut node.

pilihan. Namun, ultrasonik dapat menyebabkan pembentukan panas sehingga dapat merusak beberapa produk yang mudah rusak. Komunikasi berbasis induksi magnetik memiliki manfaat unik, seperti tidak terpengaruh oleh media yang berbeda (tidak memengaruhi jaringan, bekerja pada tingkat daya yang lebih rendah daripada komunikasi RF dan ultrasonik, serta tidak mengurangi fluktuasi sinyal). Informasi telah ditransfer ke server pusat/titik akses, kemudian dapat diintegrasikan ke dalam lapisan berikutnya. Teknologi RFID juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan melacak produk. *Reader* dan *tag* RFID dapat digunakan untuk mengakses *database* daring untuk menyisipkan atau memperoleh data yang dikumpulkan oleh sensor. RFID menjadi sangat penting bagi konsumen karena memungkinkan konsumen untuk mengakses informasi produk yang mereka inginkan, yang akan dijelaskan lebih lanjut pada lapisan persepsi.

3. Lapisan *Blockchain*

Karakteristik utama dari jaringan *blockchain* adalah bahwa buku besar utama disimpan di semua *node* (titik di mana data diperoleh atau dimasukkan) yang terlibat dalam jaringan. Hal ini berarti bahwa informasi pada semua buku besar harus identik. Apabila data akan rusak, 51% dari buku besar perlu diubah. Hal ini membutuhkan banyak kekuatan pemrosesan untuk mencapai itu. Transaksi sehubungan dengan *blockchain* berarti setiap tindakan yang dilakukan/ditorisasi oleh jaringan menggunakan semua buku besar di *node* dan kontrak yang menguraikan persyaratan yang disepakati oleh semua pihak yang terlibat (seperti petani, pengecer, transportasi, dan gudang penyimpanan). Dalam hal ini, tindakan yang dilakukan adalah menyimpan data produk dari berbagai tahapan FSC. Kontrak akan berkaitan dengan hal-hal seperti siapa yang akan memiliki akses ke setiap jenis data produk dan jenis akses apa yang akan mereka berikan ke *database* umum. Informasi dalam *database* produk tertentu disimpan dengan ID produk yang unik. Dari sini, blok akan dibuat, diverifikasi, dan diimplementasikan sehingga berisi informasi tentang transaksi terbaru dan informasi transaksi sebelumnya yang telah terjadi. Pe-

mangku kepentingan juga dapat mengakses informasi menggunakan kunci pribadi/publik yang mereka miliki sebagai pihak yang relevan dalam jaringan *blockchain*. Sistem ini menciptakan blok yang saling berhubungan berisi informasi relevan yang merujuk ke semua blok lain untuk memverifikasi keabsahan informasi dan memberikan keamanan sistem.

4. Lapisan Persepsi

Tujuan dari lapisan ini adalah mengakses data yang tersimpan dalam basis data dan menyajikannya kepada pihak-pihak terkait melalui aplikasi *mobile* atau situs web. Aplikasi ini akan menggunakan kunci (yang disebutkan di lapisan *blockchain*) untuk mendapatkan akses ke data produk yang relevan. Aplikasi ini membutuhkan input berupa ID produk unik untuk mengidentifikasi data produk yang relevan. Salah satu caranya adalah memberi label pada paket produk dengan kode QR (berisi ID unik) yang dapat dibaca oleh sebagian besar telepon genggam pintar modern dan perangkat pintar lainnya. Cara lain adalah dengan menggunakan tag RFID yang akan dibaca oleh aplikasi. Setelah data diambil, aplikasi akan menampilkan informasi penting tentang produk yang mungkin ingin diketahui konsumen. Mohan (2018) menyajikan kemungkinan penyajian informasi dalam aplikasi. Informasi ini dapat dibagi berdasarkan tahap FSC apa data diambil dan setiap bagian akan menampilkan data tentang lingkungan produk, lokasi, pihak yang bertanggung jawab atas produk pada tahap itu, dan durasi. Konsumen sekarang dapat membuat keputusan pembelian mereka berdasarkan berbagai parameter FSC dari produk tertentu. Selain itu, juga harus ada versi platform untuk pengecer yang berfungsi sebagai sistem peringatan kapan produk akan musnah dan kapan pengiriman berikutnya akan tiba. Ini akan meningkatkan efektivitas cara pengecer mengelola input dan output produk mereka di penyimpanan dan mengurangi pemborosan produk pangan yang disimpan. Produsen juga bisa mendapatkan ide yang lebih baik tentang produk mana yang paling laku terjual pada waktu tertentu dalam setahun, dengan mengoptimalkan waktu dan sumber daya mereka.

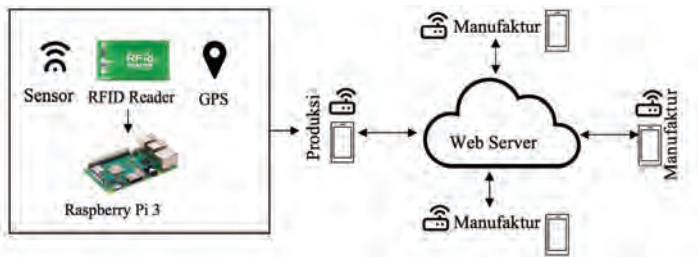
H. Implementasi Platform IoT untuk FSC

1. Deskripsi Skenario

Saat ini, banyak konsumen ingin tahu di mana makanan mereka diproduksi sebelum tersaji di meja makan (Prilliadi dkk., 2021). Beberapa konsumen lebih menyukai produk pangan tertentu yang berasal dari tempat tertentu yang mereka percaya (ketika konsumen lebih menyukai pangan lokal) atau produk mereka sukai karena rasa. Konsumen juga ingin memastikan bahwa produk pangan yang mereka beli tidak kedaluwarsa (bukan karena tanggal kedaluwarsa, tetapi karena kesalahan penanganan produk di FSC) yang mungkin sulit ditentukan sebelum tindakan pembelian. Produk pangan, seperti susu dan buah-buahan tertentu dapat rusak jika terkena suhu tertentu atau jika terjadi perubahan suhu yang signifikan. Informasi terkait asal dan kondisi produk pangan hanya tersedia untuk perusahaan di FSC, sedangkan konsumen dibiarkan mengambil produk dari toko ritel tempat mereka membeli.

2. Implementasi

Implementasinya didasarkan pada arsitektur yang diusulkan pada Gambar 4.7. Platform IoT dikembangkan menggunakan Raspberry Pi dan berbagai sensor yang akan mengirim data ke *database* (*database* dapat diakses oleh konsumen dan pemangku kepentingan

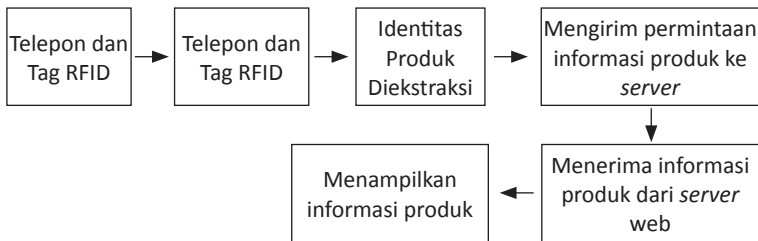


Sumber: Haroon dkk. (2019)

Gambar 4.7 Komponen Modul Sensor

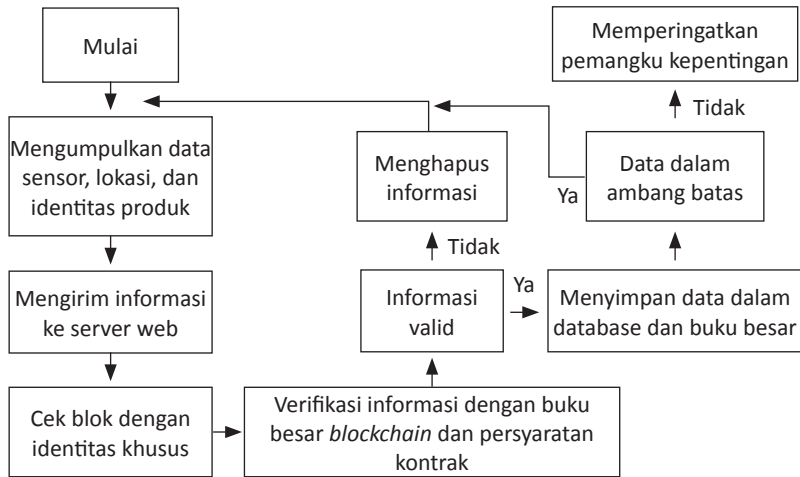
lainnya). Setiap produk diberi tag RFID, yang berisi ID produk yang unik. Setiap modul sensor terdiri dari Raspberry Pi, pembaca RFID MFRC522, sensor, dan GPS.

GPS mengirimkan lokasi produk ke Raspberry Pi 3 pada saat pembacaan sensor dilakukan. Sensor DHT11 adalah sensor yang digunakan untuk mengumpulkan data suhu dan kelembapan. Sensor DHT11 akan mengirim data ke Raspberry Pi. Pembaca RFID juga digunakan untuk membaca ID produk melalui tag RFID dan memberi sinyal pada Raspberry Pi untuk mengumpulkan sensor dan data lokasi. *Python* adalah bahasa yang digunakan untuk membuat kode yang memungkinkan Raspberry Pi untuk mengoperasikan sensor, pembaca, dan GPS serta mengirimkan informasi yang diterima ke basis data yang di-*hosting* peladen web. Konfigurasi server web untuk menerima data maka PHP digunakan untuk menulis skrip. Skrip PHP digunakan untuk menerima informasi dari Raspberry Pi dan memasukkan informasi tersebut serta stempel waktu ke *database*. Basis data MySQL dibuat untuk menyimpan semua data yang dikumpulkan. Gambar 4.8 menguraikan fungsi modul sensor dan peladen web. Ambang batas yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 adalah untuk memperingatkan pengguna/administrator tentang kondisi yang tidak biasa atau berbahaya yang dapat merusak produk. Penting untuk dicatat bahwa implementasi *blockchain* di platform IoT ini masih dalam proses. Aplikasi *mobile* yang digunakan dikembangkan pada *software* Android studio di Java.



Sumber: Haroon dkk. (2019)

Gambar 4.8 Diagram Alir Aplikasi Seluler Android



Sumber: Haroon dkk. (2019)

Gambar 4.9. Diagram Alir Modul Sensor dan Server Web

Gambar 4.8 menunjukkan diagram alir aplikasi seluler untuk mengakses basis data, mengekstrak informasi yang relevan, dan menyajikannya kepada pengguna berdasarkan permintaan. Aplikasi akan meminta pengguna untuk mengizinkan ponsel mereka membaca tag RFID produk untuk mengetahui produk mana yang memerlukan informasi tersebut. Oleh karena itu, aplikasi hanya akan berfungsi pada perangkat yang memiliki kemampuan NFC.

Produk bisa saja berada di wilayah yang berbeda sehingga data yang diperlukan sedikit berbeda. Misalnya, selama tahap transportasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 modul sensor juga akan mengirimkan asal dan tujuan transportasi serta perusahaan yang bertanggung jawab atas transportasi. Produk akan diangkut dalam paket di mana setiap paket hanya berisi satu jenis produk. Tag RFID yang dilampirkan pada paket akan berisi jenis produk apa yang ada dalam paket serta nomor yang mengidentifikasi paket (yang juga merupakan ID produk untuk semua produk). Modul sensor untuk

gudang juga beroperasi dengan cara yang sama. Namun, alih-alih mengirim asal dan tujuan, modul tersebut mengirim tanggal kedatangan dan perusahaan gudang tempat produk disimpan. Di toko ritel, setiap produk yang ada di rak akan dipasang tag RFID yang berisi ID produk/paket. Konsumen dapat mengakses informasi produk dengan membuka aplikasi dan meletakkan ponsel di sebelah tag. Aplikasi akan mengekstrak ID produk dari tag dan mengakses basis data daring. Cara ini akan menggunakan ID produk untuk memilih info produk yang relevan. Kemudian menyajikan informasi yang dipilih kepada konsumen pada aplikasi.

Studi kasus ini menunjukkan beberapa manfaat penerapan platform IoT untuk FSC. Salah satu manfaatnya adalah konsumen diberi akses ke sejumlah besar informasi tentang produk yang sebelumnya tidak tersedia. Ini akan memberdayakan konsumen dengan kesempatan untuk membuat keputusan yang tepat dan memungkinkan mereka untuk membeli produk terbaik. Manfaat lainnya adalah memungkinkan gudang untuk mengelola inventaris mereka secara lebih efektif karena mereka dapat memantau jumlah waktu produk atau paket tertentu disimpan di gudang mereka dan membuat keputusan yang sesuai. Sistem ini juga dapat membantu dalam mengidentifikasi masalah dengan FSC, seperti menemukan pengiriman yang terlambat, mengidentifikasi lokasi dari mana masalah bisa terjadi atau mengidentifikasi tahap spesifik dari perubahan FSC, di mana masalah berasal dengan memantau data suhu dan kelembapan produk.

Bagian ini menyajikan platform modern agar FSC terintegrasi dengan IoT dan *blockchain*. Bagian ini juga memberikan banyak bukti tentang efek positif yang luar biasa dari solusi berbasis TIK untuk FSC. Dengan demikian, arsitektur platform IoT yang mendukung *blockchain* untuk FSC juga direkomendasikan. Arsitektur yang direkomendasikan dapat meningkatkan FSC dengan mengganti perantara yang diperlukan untuk tujuan keamanan dengan sistem berbasis *blockchain* yang aman. Tujuan untuk masa depan adalah mengintegrasikan *blockchain* dalam implementasi platform IoT.

I. Mengintegrasikan *Internet of Things* dalam Rantai Pasok Pangan Halal

Industri halal global adalah segmen pasar yang tumbuh cepat triliunan dolar (Karia dkk., 2015). Sebuah laporan dari Dubai Islamic Economy Development Center (DIEDC) dan Thomson Reuters memperkirakan bahwa konsumen Muslim menghabiskan US\$ 1,3 triliun untuk produk pangan pada tahun 2017, dan jumlah ini diperkirakan akan mencapai US\$ 1,9 triliun pada tahun 2023 (Salaam Gateway, 2018). Ceruk pasar yang menguntungkan, karena populasi Muslim meningkat pesat, mendekati dua miliar penduduk secara global. Pertumbuhan konsumsi pangan halal sebagian besar didorong oleh umat Islam yang diwajibkan secara agama untuk mengonsumsi dan menggunakan produk atau layanan bersertifikat halal. Konsumsi juga didorong oleh permintaan di kalangan konsumen non-Muslim karena makanan halal menjaga reputasi kebersihan dan kelezatannya. Secara global, konsumen (termasuk konsumen pangan halal) meminta lebih banyak informasi mengenai pangan yang mereka konsumsi, terutama mengenai pertimbangan etis. Studi telah menunjukkan peningkatan permintaan konsumen dan preferensi untuk produk halal ketika konsumen lebih berpengetahuan dan terinformasi dengan baik tentang rantai pasok pangan halal (HFSC). Banyak bisnis pangan halal dan pemangku kepentingan di seluruh rantai pasok berusaha untuk memenuhi permintaan konsumen pangan halal, terus menjaga integritas produk halal sambil memastikan produk pangan mereka memenuhi persyaratan halal (utuh dan bebas dari aktivitas apa pun yang mungkin melanggar status halal, sengaja atau tidak sengaja). Hal ini adalah kewajiban pembuat kebijakan untuk memastikan standar ini ditegakkan dan mencegah kegiatan yang bertentangan dengan undang-undang pemerintah.

Untuk menanggapi kebutuhan pembuat kebijakan, memastikan integritas dalam HFSC dan memenuhi permintaan konsumen pangan halal, aktor HFSC perlu mengeksplorasi peran potensial teknologi di seluruh HFSC karena alat dan metodologi saat ini tidak aman, sering

kali tidak dapat diandalkan, dan tidak efisien. Dalam hal ini, salah satu teknologi yang berkembang pesat untuk dipertimbangkan adalah *Internet of Things* (IoT). Seperti sudah disampaikan sebelumnya, IoT adalah jaringan perangkat yang terhubung secara nirkabel, dan mentransfer data melalui konektivitas internet untuk penyimpanan di *server cloud*. Layanan *cloud* dapat mendukung aktivitas berbagi data yang aman, mewujudkan profitabilitas yang lebih besar melalui efisiensi bisnis dalam bentuk proses pengambilan keputusan yang dipercepat, dan mengurangi pemborosan dan inefisiensi operasional. Dengan memanfaatkan IoT, integritas halal dapat dipertahankan di HFSC dan masalah yang terkait dengan menjaga integritas halal di antara pelaku rantai pasok halal dapat diselesaikan. Agar tetap kompetitif, ekosistem pangan halal perlu mengeksplorasi potensi signifikan dari teknologi IoT untuk menjawab tantangan tuntutan konsumen dan standar peraturan serta mewujudkan peluang bisnis melalui efisiensi operasional dan dukungan keputusan yang berwawasan luas di seluruh HFSC.

1. Ketertelusuran HFSC

Ketertelusuran didefinisikan sebagai kemampuan untuk menemukan hewan, komoditas, produk pangan atau bahan, dan mengakses semua informasi yang terkait dengan siklus hidup mereka di seluruh rantai pasok. Ketertelusuran adalah komponen penting dari sistem pangan untuk memastikan kualitas dan keamanan pangan. Definisi ketertelusuran terdiri dari “penelusuran” dan “pelacakan”. Penelusuran berupa pandangan ke belakang—menelusuri produk pangan dari ritel kembali ke pemasok, sedangkan pelacakan adalah pandangan ke depan^{3/4} mengikuti produk pangan di sepanjang rantai pasok hilir saat produk dipertukarkan antara mitra dagang. Ketertelusuran dianggap sebagai mekanisme untuk memastikan standar kualitas dan keamanan pangan, menjaga keberlanjutan, dan menurunkan biaya keseluruhan rantai pasok. Teknologi IoT memiliki potensi untuk memainkan peran penting dalam memastikan keterlacakan HFSC yang efektif dan integritas produk pangan di seluruh rantai pasok. IoT

dapat secara signifikan memfasilitasi manajemen pangan, mengurangi kerumitan dalam proses keterlacakan, dan memfasilitasi pelacakan dan penelusuran informasi produsen pangan. Teknologi IoT, termasuk RFID dan sensor, diakui sebagai alat penting untuk ketertelusuran dan pemantauan daging halal melalui seluruh rantai pasok dari lahan hingga tersaji di meja makan.

Dalam literatur, teknologi RFID diketahui sebagai teknologi IoT utama dan beberapa ahli berpendapat bahwa mereka dapat mendukung pemasok pangan halal dan penyedia logistik pihak ketiga dan membantu mereka dalam menyertifikasi status halal. Penekanan pada aplikasi RFID di HFSC memiliki beberapa alasan. Secara umum, RFID mengungguli alat pelacak konvensional seperti barcode untuk pangan halal, mencapai tingkat keamanan data yang tinggi, meningkatkan visibilitas operasional produk di seluruh rantai pasok, dan memberikan identifikasi produk yang lebih cepat dan lebih andal. Tag RFID dicirikan oleh kapasitas penyimpanannya yang tinggi, yang berguna untuk mengamankan informasi terkait produk. Untuk menguji efektivitas teknologi RFID, Mohammed dkk. (2017) mengembangkan sistem pemantauan berbasis RFID untuk rantai pasok daging halal yang telah terbukti bermanfaat untuk menjaga kualitas produk daging halal melalui pemantauan suhu wadah secara konsisten dan pemberitahuan kepada pengangkut jika terjadi kenaikan suhu di atas tingkat ambang batas tertentu. Demikian pula, Rejeb (2018) mengusulkan kerangka kerja konseptual untuk sistem yang menanamkan hukum makanan Islam ke dalam *Hazard Analysis and Critical Control Point* (HACCP) menggunakan *blockchain* dan IoT. Penulis berpendapat bahwa sistem ini dapat digunakan untuk memastikan keterlacakan rantai pasok daging halal secara *real-time* dan *end-to-end*.

Selain itu, kombinasi teknologi *blockchain* dan IoT dapat menjadi alat yang ampuh untuk mengatur proses pangan halal dan memastikan HFSC yang terorganisasi sendiri, transparan, dan cerdas. Memanfaatkan *blockchain* dengan teknologi IoT dalam industri pangan halal sehingga memiliki potensi untuk merestrukturisasi cara konvensional dalam mengelola ketertelusuran pangan halal, mempromosikan lebih

banyak kredibilitas dan kepercayaan, serta meningkatkan ekonomi Islam secara luas. Oleh karena itu, negara-negara berkembang yang ingin memperkuat ekonomi mereka dan membuka potensi penuh dari sektor pangan halal dapat memanfaatkan teknologi baru, seperti IoT, komputasi awan, dan *blockchain* untuk memfasilitasi pelacakan produk pangan dan menciptakan ekosistem pangan halal yang lebih transparan dan terintegrasi.

2. Efisiensi HFSC

Efisiensi rantai pasok pangan sebelumnya telah mendapat perhatian yang signifikan dari para akademisi. Mempertahankan tingkat efisiensi yang tinggi merupakan prioritas bagi banyak bisnis yang beroperasi di sektor pangan. Peningkatan tekanan konsumen dan permintaan akan kualitas dan keamanan pangan merupakan faktor pendorong yang menekan organisasi pangan untuk meningkatkan efisiensi proses FSC mereka. Untuk bisnis pangan halal, teknologi IoT dapat meningkatkan efisiensi rantai pangan. Melalui arus informasi yang ditingkatkan, teknologi IoT dapat mengurangi pemborosan dari proses yang tidak efisien, inventaris yang berlebihan, kehabisan stok, dan variabilitas rantai pasok sekaligus menjamin pasokan pangan yang konstan dan halal. Penggunaan IoT selanjutnya dapat membantu organisasi pangan untuk beroperasi lebih berkelanjutan dengan meminimalisasi biaya akibat inefisiensi operasional dan memastikan aliran barang yang konsisten. Identifikasi cepat produk dengan teknologi pelacakan IoT dapat menghasilkan peningkatan koordinasi proses HFSC, hasil pengambilan keputusan yang lebih efektif, dan aktivitas pangan yang disederhanakan seperti pengiriman, pergudangan, dan penanganan.

IoT dapat mendukung otomatisasi pengambilan data dan dokumentasi yang menghasilkan entri dan operasi data yang lebih andal dan mengurangi kesalahan entri manual. Melalui otomatisasi yang didukung IoT, tugas manual dapat digantikan oleh operasi elektronik dan tanpa kertas, yang mengarah pada penghematan biaya yang signifikan, optimalisasi sumber daya, dan arus informasi yang efisien di antara para pemangku kepentingan HFSC. Misalnya, aplikasi RFID

dapat mendorong efisiensi yang lebih besar karena bekerja tanpa kontak dan jarak jauh, keterbacaan yang cepat, dan kemampuan penyimpanan data yang ekstensif. Selain itu, penggunaan teknologi RFID dalam jaringan sensor dapat mengoptimalkan dan memastikan pengiriman produk pangan ke konsumen akhir dalam kondisi sehat dan segar.

Khosravi dkk. (2018) mengusulkan sistem yang menggabungkan RFID dan NFC dan menemukan tingkat kepuasan pengguna yang dapat diterima dengan efisiensi aplikasi. Teknologi IoT juga dapat memenuhi kebutuhan interoperabilitas dan merampingkan alur kerja pangan halal karena memungkinkan otomatisasi tingkat tinggi proses pangan halal, yang dapat meluas ke aktivitas transportasi. Sistem informasi geografis (GIS) yang dikombinasikan dengan teknologi RFID juga dapat membantu mencapai perencanaan dan operasi yang lebih baik dalam transportasi produk pangan halal. Penulis lebih lanjut mencatat bahwa bisnis pangan halal dapat mengambil manfaat dari teknologi ini dengan mengoptimalkan logistik transportasi dan meningkatkan aktivitas bongkar muat. Untuk meminimalkan risiko kontaminasi silang selama transportasi, Mohamad dkk. (2016) mengembangkan sistem pelacakan yang disebut “Halaltracer” dengan memanfaatkan kombinasi teknologi GPS dan *geofencing*. Sistem yang diusulkan dapat memfasilitasi pelacakan proses pengiriman produk halal, memantau penghentian kendaraan secara *real-time*, dan mengontrol tindakan pengemudi, seperti pemberhentian yang tidak direncanakan di lokasi yang tidak diketahui untuk mencampur produk halal dan non-halal. Teknologi IoT juga telah terbukti meningkatkan integritas pangan halal dengan mencegah pemisahan pangan halal dan non-halal selama proses penanganan dan transportasi.

3. Manajemen Produk Ternak Halal

Untuk mempertahankan keunggulan kompetitif, beberapa negara sedang mempertimbangkan penggunaan teknologi baru untuk pengumpulan data, pencatatan, dan pengelolaan ternak. Penyediaan produk ternak merupakan proses yang semakin kompleks dan intensif

yang memerlukan penggunaan teknologi canggih untuk memudahkan pemantauan dan pengendalian lokasi dan kesehatan ternak. Pasar ternak halal menghadapi ketidakpastian yang meningkat. Beberapa langkah dapat diterapkan untuk meningkatkan kepercayaan konsumen dalam praktik halal di peternakan, termasuk pengambilan data tentang praktik manajemen di peternakan, lokasi peternakan tetangga, protokol pemberian pakan ternak halal, kesejahteraan hewan, penunjang kesehatan (misalnya, obat-obatan dan vaksinasi), proses pada saat penyembelihan, pendinginan yang tepat, dan transportasi produk. Implementasi IoT memiliki potensi untuk meningkatkan transparansi di HFSC dan oleh karena itu, pada akhirnya, meningkatkan kepercayaan konsumen.

Mohammed dkk. (2017) mengusulkan sistem berbasis teknologi RFID untuk pemantauan rantai pasok daging halal di mana tag sensor 2G-RFID (RFID generasi kedua) digunakan untuk menyimpan informasi pasif dan aktif, mengidentifikasi ternak secara otomatis, dan memantau status kesehatan setiap hewan (misalnya, denyut nadi dan suhu). Sensor juga dipasang di bak air untuk mengurangi kemungkinan kontaminasi, mengantisipasi potensi risiko halal, dan menyediakan kontrol operasional *real-time* dan proaktif. Sistem IoT berbasis teknologi RFID sangat cocok untuk mengelola ternak karena efisien, cepat, dan memiliki kapasitas penyimpanan yang tinggi untuk informasi terkait hewan di tingkat individu, seperti tanggal pembelian, siklus pembiakan, nutrisi, obat hewan dan pencegahan epidemi. Oleh karena itu, peternak halal dapat memastikan pencatatan dan pengelolaan data yang andal yang mampu mengurangi risiko kontaminasi ternak. Dalam hal pengiriman ternak, data dan informasi hewan dapat berfungsi sebagai sertifikat apabila terjadi wabah penyakit, malapraktik, atau masalah yang berkaitan dengan status produk pangan halal.

4. Autentikasi Produk Halal

Autentikasi pangan adalah proses analisis kritis yang memverifikasi dan memvalidasi informasi label mengenai asal pangan dan proses

produksi. Globalisasi rantai pasok pangan dan struktur multidimensi dari industri pertanian pangan telah meningkatkan kerentanannya dan memunculkan berbagai kemungkinan gangguan berbahaya. Misalnya, setiap saat dalam siklus hidup produk, produk pangan dapat terkena pemalsuan dan penggantian bahan untuk keuntungan moneter. Konsekuensi negatif dari pemalsuan pangan membahayakan kualitas dan keamanan pangan, menodai reputasi bisnis pangan, dan merusak kepercayaan konsumen. Dalam konteks halal, rantai pangan sering terancam oleh kontaminasi, pencampuran produk halal dan non-halal, pemalsuan, kontaminasi silang, dan misrepresentasi produk halal dengan produk dan bahan non-halal seperti enzim babi. Selain bersifat toksik atau alergen, bahan pencemar yang mengandung residu babi atau bahan yang diragukan dapat menurunkan kehalalannya terutama bagi produsen pangan yang bersertifikat halal. Oleh karena itu, autentikasi pangan halal sangat penting untuk memastikan kepercayaan status halal produk dan memastikan perlindungan konsumen.

Para ahli berpendapat bahwa teknologi RFID adalah alat yang berguna untuk memfasilitasi proses autentikasi pangan halal. Dalam konteks ini, teknologi penandaan halal dapat memberdayakan konsumen dan meningkatkan kemampuan mereka untuk melacak keaslian logo halal pada kemasan produk. Penulis selanjutnya menyarankan bahwa kombinasi teknologi IoT, tag RFID, dan kode respons cepat/*quick response* (QR) merupakan solusi yang dapat diterapkan dan efektif untuk memverifikasi status halal produk. Untuk mengatasi pemalsuan logo halal, Mohd Albakir dan Mohd-Mokhtar (2011) mengembangkan desain konseptual detektor logo halal yang dapat digunakan untuk memeriksa ulang keaslian logo yang tercetak pada produk pangan, sehingga mengidentifikasi produk pangan halal asli dengan mudah. Mengenai teknologi penandaan IoT, Nasir dkk. (2011) menyarankan sistem berbasis RFID dan, berdasarkan survei yang menilai efektivitas prototipe, melaporkan bahwa 86% pengguna sangat setuju pada kegunaan RFID untuk memerangi praktik pemalsuan dan mendukung kepercayaan konsumen Muslim dalam autentikasi makanan halal asli. Para penulis juga menyatakan bahwa pengguna

menyambut baik teknologi RFID karena pengambilan informasi yang cepat, perlindungan terhadap duplikasi atau pemalsuan yang tidak sah, kriptografi, sinkronisasi dan koordinasi proses bisnis.

Senada dengan itu, Anir dkk. (2008) mengembangkan sistem di mana data EPC (Electronic Product Code) disimpan dalam tag RFID mikroskopis, dan konsumen dapat menggunakan pembaca RFID untuk mengidentifikasi harga dan status kehalalan produk pangan. Saba (2017) memperkenalkan sistem yang menggunakan teknologi RFID untuk mengetahui atribut produk pangan (melalui pembaca RFID) berupa keterangan halal dan haram. Penggunaan IoT dalam pelabelan produk dapat memungkinkan penyebaran informasi dan mendukung konsumen halal dalam memantau kualitas pangan dan status halal. Singkatnya, autentikasi produk pangan halal yang andal dapat membantu mencegah praktik penipuan dan mendukung otoritas publik dalam menjatuhkan tindakan hukum dan sanksi jika terjadi insiden pangan palsu.

5. Sertifikasi Pangan Halal

Menjaga integritas produk pangan halal di seluruh rantai pasok menjadi perhatian signifikan bagi konsumen karena kurangnya penegakan halal, penggunaan teknologi informasi yang tidak etis, dan terjadinya aktor buruk serta malpraktik dalam industri pangan. Tantangan tersebut membuat konsumen mempertanyakan keandalan sertifikasi halal. Sertifikasi halal adalah salah satu bidang utama penelitian halal, yang melibatkan verifikasi keaslian pangan halal dan sesuai dengan hukum aturan pangan dalam Islam. Sertifikasi halal dimaksudkan sebagai bukti bahwa pemasok pangan telah memastikan proses yang tepat, namun, sertifikasi produk pangan halal tidak memerlukan pengawasan untuk memastikan kepatuhan tetap terjaga. Mengamankan sertifikasi halal bukanlah proses yang sederhana dan memerlukan pihak berwenang untuk melakukan penyelidikan menyeluruh mengenai informasi latar belakang dari perusahaan yang meminta sertifikasi. Selain itu, mitra HFSC masih dapat dengan sengaja menyesatkan dan menggambarkan diri mereka sendiri kepada otoritas inspeksi halal.

Untuk mengatasi masalah ini, penggunaan teknologi baru direkomendasikan untuk menyederhanakan, mempercepat, dan meningkatkan proses sertifikasi halal. Misalnya, kombinasi teknologi *blockchain* dan IoT telah diakui sebagai fondasi harmonisasi, transparansi, dan keandalan sertifikasi halal. Masalah yang disebabkan oleh prosedur yang panjang, keluhan halal, dan bahaya keamanan pangan dapat dipantau dan diverifikasi secara *real-time* menggunakan aplikasi *blockchain* dan kemampuan *traceback* yang kuat. Dikombinasikan dengan teknologi IoT, *blockchain* dapat memberikan konsumen halal peningkatan visibilitas atas asal produk pangan dan bahan-bahannya. Terkait sertifikasi halal, penerapan teknologi NFC untuk memeriksa autentikasi sertifikat. Potensi manfaat dari sistem tersebut termasuk fasilitasi regulasi dan norma sertifikasi serta pemantauan status sertifikasi halal yang mudah. Selain itu, berinvestasi dalam teknologi IoT dapat memberi sinyal kepada calon konsumen bahwa bisnis pangan dapat dipercaya dan mengikuti pedoman ketat untuk menjaga perilaku etis dan menjaga status halal pangan. Dengan teknologi IoT, bisnis pangan halal dapat termotivasi untuk meningkatkan kepatuhan halal mereka, meningkatkan reputasi mereka sebagai merek bersertifikat halal, dan mencapai pengakuan merek yang kuat dan keunggulan kompetitif. Dalam hal ini, teknologi IoT dapat memberikan peluang dan motivasi bagi perusahaan pangan untuk menjadi lebih efisien, menawarkan produk pangan halal berkualitas tinggi, memaksimalkan laba atas investasi, dan meningkatkan kepuasan konsumen.

J. Tantangan IoT dalam HFSC

1. Keterbatasan Teknis Teknologi IoT

Meskipun teknologi IoT dapat membuka banyak peluang di HFSC, keterbatasan teknis perangkat IoT tetap menjadi tantangan utama yang sering digariskan dalam literatur pangan halal, misalnya, konektivitas IoT tetap bermasalah. Penggunaan tag RFID memerlukan konektivitas internet yang andal, yang mungkin tidak selalu tersedia bagi konsumen yang ingin memverifikasi status halal produk pangan.

Tantangan lain adalah semua prototipe dan aplikasi IoT memerlukan akses ke internet untuk beroperasi dengan baik. Kurangnya akses internet dapat mengakibatkan kegagalan sistem yang diaktifkan oleh IoT, membatasi aliran informasi dan produk, dan menghalangi implementasi proses HFSC yang terintegrasi dan efisien. Di negara berkembang, meskipun ada upaya untuk membangun pusat halal global, banyak toko ritel di seluruh negeri kekurangan konektivitas internet yang memadai. Selain itu, aplikasi IoT dapat menimbulkan risiko keamanan; misalnya, tag RFID rentan terhadap pemalsuan, peretasan, dan akses tidak sah. Pertimbangan lebih lanjut adalah kompleksitas sistem IoT, misalnya penerapan penandaan seluler IoT dalam HFSC dapat mengakibatkan proses *opacity*, kurangnya keterlibatan pengguna, dan keengganan untuk beralih ke HFSC yang mendukung IoT. Kemampuan pemrosesan yang rendah dari jaringan sensor nirkabel dan daya tahan baterai yang terbatas dari sensor RFID dan IoT selanjutnya dapat membatasi kegunaan jangka panjang dari teknologi IoT di HFSC.

2. Ketidakmatangan dan Kurangnya Penerimaan Pengguna

Ketidakmatangan teknologi IoT dapat menjadi hambatan implementasi. Teknologi RFID masih dalam tahap awal, dan bisnis pangan semakin mengandalkan barcode sebagai pengidentifikasi otomatis terlepas dari prevalensi portal web dan aplikasi telepon. Teknologi RFID kurang disukai untuk pelacakan pangan halal dibandingkan dengan layanan pesan singkat (SMS). Kurangnya aplikasi IoT komersial di HFSC mungkin terbukti menjadi hambatan yang signifikan untuk adopsi. Ketidakmatangan teknologi IoT meningkatkan ketidakpastian di antara bisnis pangan halal karena ada ketidakjelasan, pemahaman, dan standar. Akibatnya, kemampuan organisasi pangan halal untuk mengembangkan kasus penggunaan bisnis yang menarik untuk adopsi teknologi IoT merupakan tantangan yang signifikan. Kurangnya penerimaan konsumen terhadap teknologi IoT dapat mengakibatkan nilai yang kurang dirasakan dan karenanya, tingkat

adopsi teknologi baru yang lebih rendah. Konsumen halal mungkin tidak dapat memanfaatkan teknologi IoT jika mereka tidak sadar teknologi dan buta huruf sehingga pengenalan teknologi baru sering kali menimbulkan hambatan pengetahuan yang signifikan.

3. Hambatan Biaya dan Peraturan

Biaya merupakan penghalang penting lainnya untuk penyebaran dan adopsi IoT di HFSC. Biaya teknologi IoT menjadi perhatian utama untuk bisnis pangan halal. Adopsi teknologi RFID juga terbatas karena biaya yang mahal. Secara empiris, Nasir dkk. (2011) menyoroti hambatan biaya, melaporkan bahwa 18% dari responden yang disurvei menganggap RFID sebagai teknologi yang tidak terjangkau yang mengakibatkan minat adopsi rendah. Secara keseluruhan, bisnis kecil pangan halal dengan sumber daya terbatas mungkin tidak dapat berinvestasi dalam teknologi baru seperti IoT untuk kegiatan pemantauan. Hal ini karena memerlukan biaya tambahan pengembangan teknologi informasi (TI) untuk kemampuan sistem lebih lanjut. Dukungan kelembagaan dan peraturan perlu diimplementasikan dengan cara yang dapat mengatasi tantangan yang terkait dengan adopsi teknologi IoT di HFSC. Tidak adanya kerangka kerja yang komprehensif dan kelembagaan di HFSC merupakan rintangan utama bagi keberhasilan operasi logistik, bahkan dengan adopsi teknologi IoT, layanan daring, dan sumber daya rantai dingin. Selain itu, manajemen dan dukungan TI yang buruk juga dapat memperlambat adopsi IoT sehingga menghambat bisnis pangan halal menyadari manfaat teknologi baru. Penggunaan arsitektur objek digital (DOA) di IoT masih kontroversial secara politis. Oleh karena itu, pemerintah perlu mengatasi masalah ini dengan cara yang lebih serius. Kita bisa dengan mudah memahami bahwa setiap IoT memiliki kelebihan dan kekurangan, bahkan memerlukan pengenalan pada pengguna dan meyakinkan mereka untuk mau menggunakan teknologi IoT ini. Begitu pun dalam penerapannya, teknologi IoT perlu dikombinasikan dengan teknologi digital lain agar pengguna mampu mendapatkan hasil yang optimal. Seperti yang telah disampaikan sebelumnya bahwa integrasi IoT dengan *block-*

chain dapat membuat FSC menjadi transparan, menjadikannya lebih produktif dengan memberikan informasi yang dapat dipercaya dan aman, baik kepada konsumen maupun pihak terkait. Dengan kata lain, *blockchain* dapat digunakan secara bersinggungan dengan teknologi IoT untuk memodernisasi dan mengoptimalkan FSC konvensional. Mengingat perlunya kolaborasi antara dua teknologi ini, Bab V mulai mendalami *blockchain* beserta manfaatnya dalam bidang rantai pasok pangan.



BAB 5

Kemunculan Teknologi *Blockchain* dalam Pertanian dan Rantai Pasok Pangan

A. Manfaat *Blockchain* dalam Rantai Pasok Pangan

Rantai pasok berkembang menjadi jaringan otomatis dan sangat kompleks serta menjadi sumber penting dari potensi manfaat di dunia modern. Pada saat yang sama, konsumen sekarang lebih tertarik pada kualitas produk pangan. Namun, sulit untuk melacak asal data dan mempertahankan ketertelusurannya di seluruh jaringan rantai pasok. Rantai pasok tradisional bersifat terpusat dan mereka bergantung pada pihak ketiga untuk berdagang. Sistem terpusat ini tidak memiliki transparansi, akuntabilitas, dan kemampuan audit. Rantai pasok pertanian pangan (*agri-food*) berbasis *blockchain* memanfaatkan fitur-fitur utama dari *blockchain* dan kontrak pintar, yang digunakan melalui jaringan *blockchain* ethereum. Meskipun *blockchain* memberikan kekekalan data dan catatan dalam jaringan, ia masih gagal memecahkan beberapa masalah utama dalam manajemen rantai pasok, seperti kredibilitas entitas yang terlibat, akuntabilitas proses

perdagangan, dan keterlacakan produk. Oleh karena itu, diperlukan sistem yang andal untuk menjamin ketertelusuran, kepercayaan, dan mekanisme pengiriman dalam rantai pasok *agri-food*. Semua transaksi harus ditulis ke *blockchain* yang pada akhirnya data harus diunggah ke *Interplanetary File Storage System (IPFS)*. Sistem penyimpanan mengembalikan *hash*¹⁷ data yang disimpan di *blockchain* dan memastikan solusi yang efisien, aman, dan andal. Sistem menyediakan kontrak pintar beserta algoritmanya untuk menunjukkan interaksi entitas dalam sistem. Selain itu, simulasi dan evaluasi kontrak pintar bersama dengan analisis keamanan dan kerentanan juga disajikan dalam bab ini.

Inti dari *blockchain* adalah skema teknis dari basis data yang andal yang dikelola secara kolektif dengan metode terdesentralisasi dan tanpa kepercayaan. Skema teknis ini dapat membuat blok melalui sejumlah *node* dalam sistem dengan menggunakan kriptografi. Sama seperti namanya: rantai balok (*blockchain*). Setiap blok berisi data semua transaksi dalam sistem dengan jangka waktu tertentu, dan dapat membuat sidik jari digital yang dapat digunakan untuk memverifikasi keabsahan informasi dan terhubung dengan blok berikutnya (Bruce, 2013). Blok dihubungkan satu sama lain dalam urutan kronologis linier (seperti rantai) dengan setiap blok berisi *hash* dari blok sebelumnya.

Teknologi *blockchain* dapat divisualisasikan sebagai istilah umum untuk skema teknis yang mirip dengan *Not Only Structured Query Language (NoSQL)*, dan dapat diwujudkan dengan berbagai jenis bahasa pemrograman. Saat ini, ada beberapa metode untuk mencapainya, seperti *proof of work (PoW)*, *proof of stake (PoS)*, dan *delegated proof of stake (DPoS)*.

Menurut definisi *blockchain* di atas, sistem berbasis *blockchain* harus memiliki beberapa fitur: desentralisasi, tanpa kepercayaan, basis data kolektif, andal, dan anonimitas. Terdesentralisasi berarti tidak

¹⁷ *Hash* adalah fungsi yang memenuhi tuntutan terenkripsi yang diperlukan untuk menyelesaikan komputasi *blockchain*. Panjang *hash* bersifat tetap karena hampir tidak mungkin untuk menebak panjang *hash* jika seseorang mencoba memecahkan *blockchain*.

ada organisasi di seluruh jaringan, dan bahkan jika sebuah *node* rusak, seluruh sistem akan tetap aktif. Oleh karena itu, sistem *blockchain* sangat kuat. Tanpa kepercayaan artinya karena seluruh sistem berjalan secara transparan, sistem ini benar-benar bersumber terbuka (*open source*) dan tidak memerlukan kepercayaan di antara setiap *node* karena setiap *node* tidak akan pernah bisa menipu *node* lain. Blok sistem ini dipelihara secara kolektif, artinya blok sistem dikelola oleh semua *node* di seluruh sistem, dan setiap orang dapat menjadi satu *node* sistem setelah mendaftar secara daring. Adanya basis data yang andal diartikan bahwa setiap *node* dapat menerima salinan lengkap *database* dari sistem melalui bentuk *subdatabase*. Merusak *database* oleh satu *node* tidak valid, dan itu tidak dapat memengaruhi data dari *node* lain, kecuali jika seseorang dapat mengontrol lebih dari 51% dari *node* di seluruh sistem pada waktu yang sama. Jadi, jika ada lebih banyak *node* dalam sistem, itu akan lebih aman. Anonimitas dimaknai karena tidak perlu kepercayaan antar-*node*, *node* tidak perlu mengungkapkan identitasnya, dan semua *node* dalam sistem bersifat anonim.

Masalah inti yang dipecahkan oleh teknologi *blockchain* adalah bagaimana kita dapat membangun landasan konsensus untuk transaksi informasi yang aman tanpa khawatir tentang data yang rusak ketika ada *node* yang tidak dapat dipercaya di seluruh jaringan. *Blockchain* dapat menjamin keamanan seluruh jaringan dengan menggunakan mekanisme algoritma matematika. Berkat *blockchain*, semua *node* dalam sistem dapat bertukar data mereka secara mandiri dan aman di lingkungan yang tidak memerlukan kepercayaan.

Supply Chain Management (SCM) adalah sekelompok proses dan subproses yang dilakukan untuk mengubah bahan mentah menjadi produk akhir, memaksimalkan nilai konsumen, dan mencapai keunggulan kompetitif yang dapat dipertahankan. Ini juga diartikan sebagai jaringan entitas yang merupakan bagian dari sistem mulai dari produksi hingga perdagangan. Seluruh jaringan rantai pasok dibagi menjadi beberapa tahap. Proses yang terlibat dalam tahapan ini sering kali membutuhkan waktu berbulan-bulan untuk diselesaikan. Dalam

situasi seperti itu, jika produk akhir kurang berkualitas, akan menjadi sangat sulit untuk melacak akar penyebab masalah.

Untuk mendapatkan kepercayaan konsumen akhir, otoritas rantai pasok harus efisien dan akurat dalam menyampaikan informasi. Penting juga bagi otoritas rantai pasok untuk mematuhi kualitas, integritas, dan kredibilitas seluruh proses rantai pasok. Beberapa otoritas pengatur telah menerapkan standar untuk meningkatkan kualitas, transparansi, dan keamanan untuk sistem keterlacakan rantai pasok. Standar-standar ini secara ketat ditegakkan oleh pemerintah beberapa negara. Pemerintah Kanada misalnya, telah memberlakukan penggunaan mau dan kode batang untuk mengidentifikasi asal produk. Penegakan serupa juga diberlakukan oleh Pemerintah Tiongkok. Tujuan dari peraturan ini adalah untuk meningkatkan transparansi sistem ketertelusuran serta memastikan kualitas produk yang tinggi.

Selain tanggung jawab untuk menjaga ketertelusuran, sistem rantai pasok juga bertindak sebagai pintu gerbang untuk produk perdagangan. Sistem ini memproses sejumlah besar data transaksional dan dengan demikian menambah lebih banyak kompleksitas pada arsitektur jaringan. Jaringan ini umumnya terpusat, jadi, ada risiko untuk representasi informasi yang salah atau tidak akurat. Selain itu, skema penyimpanan terpusat yang digunakan dalam jaringan rantai pasok sering kali tidak dapat menangani sejumlah besar data yang menyebabkan kemacetan yang tidak dapat dihindari. Oleh karena itu, tentunya akan memengaruhi kinerja jaringan secara keseluruhan.

Sistem terdistribusi menawarkan toleransi kesalahan, skalabilitas, pemrosesan bersamaan, dan skema penyimpanan yang lebih baik. Munculnya *blockchain* sebagai teknologi dasar Bitcoin diakui oleh beberapa industri di seluruh dunia, misalnya keuangan, *Electronic Medical Records* (EMR), *Internet of Things* (IoT), dan energi i. Ini adalah sistem aman yang mengatasi risiko sistem terpusat yang disebutkan di atas. Namun, jaringan *blockchain* saat ini bukanlah solusi satu ukuran untuk semua, terutama untuk domain berbasis data karena menghadapi masalah latensi, penyimpanan, dan hasil produksi. Beberapa arsitektur jaringan dan protokol konsensus terdis-

tribusi menjaga integritas *blockchain* sambil memungkinkan kuantitas hasil produksi yang tinggi dan kemampuan penyimpanan yang meningkat, disampaikan oleh Turri dkk. (2017). Dalam hal rantai pasok *agri-food*, pemantauan produk dengan efisien sangat penting untuk keamanan produk. Kekhawatiran yang berkembang dari konsumen dan pemerintah mengenai kualitas pangan juga telah memperbarui konsep ketertelusuran dalam rantai pasok. Namun, *blockchain* memainkan peran penting dalam evolusi rantai pasok dengan sifat bawaannya, seperti desentralisasi, transparansi, dan kekekalan. Selain itu, ia juga menyediakan kontrak cerdas yang memanfaatkan transaksi perdagangan yang aman antarentitas. Terlepas dari sifat kurang kepercayaan dari rantai pasok *agri-food* berbasis *blockchain*, sulit bagi konsumen akhir untuk mempercayai pemilik produk dan kualitas produk sebelum melakukan transaksi.

Selain itu, skema penyimpanan terpusat tradisional tidak dapat menangani sejumlah besar data yang dihasilkan selama proses rantai pasok dan akibatnya menyebabkan kemacetan. Oleh karena itu, beberapa skema penyimpanan terdesentralisasi diusulkan dalam literatur untuk mengatasi masalah seperti latensi tinggi, *throughput*¹⁸ rendah, dan kemacetan. Salah dkk. (2019) mengusulkan skema keterlacakan kedelai berbasis *blockchain*. Kontrak pintar ethereum dan Sistem Penyimpanan File Antarplanet (IPFS) digunakan untuk mencapai ketertelusuran lengkap dalam sistem yang diusulkan. IPFS adalah sistem penyimpanan file *peer-to-peer* yang populer dan terdesentralisasi. IPFS menggunakan teknologi seperti pertukaran blok berinsentif dan Tabel Hash Terdistribusi. Di sini, *node* tidak saling percaya dan tidak ada titik kegagalan. Namun, data yang disimpan dalam IPFS dapat diakses dengan mudah jika *hash*-nya tersedia. Selain itu, Salah dkk. (2019) tidak mempertimbangkan akuntabilitas dan auditabilitas perdagangan dan pengiriman data. Selain itu, karena

¹⁸ *Throughput* adalah ukuran berapa banyak tindakan yang diselesaikan dalam jangka waktu tertentu. Di ruang *blockchain*, *throughput* transaksi mengacu pada tingkat seberapa cepat *blockchain* memproses transaksi, yang biasanya dinyatakan dalam transaksi per detik (TPS), tetapi juga dapat dinyatakan dalam menit (TPM) atau jam (TPH).

rantai pasok *agri-food* bergerak menuju *e-agriculture*, ada kebutuhan mekanisme pembayaran otomatis terdesentralisasi yang memastikan bahwa entitas di seluruh sistem mematuhi komitmen selama transaksi. Hao dkk. (2018) mengusulkan skema penyimpanan yang efisien untuk pelacakan *agri-food*. Hash transaksi dalam solusi yang diusulkan disimpan dalam database sekunder. Untuk mengambil data dari IPFS, hash transaksi diakses dari basis data sekunder. Menggunakan hash transaksi tersebut, hash IPFS diambil dari *blockchain*. Namun, jika *database* sekunder gagal, seluruh sistem akan gagal. Demikian pula, Wang dkk. (2019) mengusulkan protokol yang dapat diaudit untuk transaksi transparan dan bukti kerusakan antara entitas perdagangan. Entitas perdagangan adalah pedagang, perusahaan logistik dan konsumen. Namun, penulis belum mempertimbangkan kredibilitas pedagang dan kepercayaan antarentitas perdagangan. Selain itu, jaringan perdagangan yang ada memiliki asimetri informasi antara pembeli dan penjual. Informasi yang asimetris menghasilkan kredibilitas yang buruk dari entitas perdagangan dan konsumen akhir menjadi rentan terhadap transaksi penipuan.

Keamanan pangan akhir-akhir ini semakin menjadi perhatian bagi industri komersial dan akademisi. Sebagian besar solusi sampai saat ini terpusat dan mengakibatkan masalah serius seperti penipuan, gangguan dan masalah orang perantara. Oleh karena itu, berbagai literatur telah memperkenalkan beberapa keterlacakan berbasis *blockchain* dan keamanan informasi dalam sistem rantai pasok *agri-food*. Di sini, Caro dkk. (2018) telah mengusulkan skema keterlacakan berdasarkan Analisis Bahaya dan Pengendalian Titik Kritis/*Hazard Analysis Critical Control Point (HACCP)*, *blockchain*, dan IoT. Selain itu, *blockchain* bersama dengan kelebihanannya juga memiliki beberapa kelemahan, yaitu tidak memiliki skalabilitas ketika data meningkat ke titik tertentu. Dalam hal ini, BigChainDB digunakan untuk mengisi celah yang menyediakan solusi terukur. Solusi yang diusulkan kemudian diterapkan pada skenario contoh untuk menunjukkan transparansi dan efisiensi yang signifikan dan bagaimana hal itu mendukung peraturan HACCP. Namun, skema

yang diusulkan tidak menentukan rincian kepemilikan produk saat ini. Selain itu, studi kasus tentang ketertelusuran produk disampaikan oleh Li dkk. (2018). Menurut penulis, menelusuri asal produk dalam rantai pasok harus transparan, tidak rusak dan adaptif terhadap lingkungan yang berubah. Oleh karena itu, mereka telah merancang rantai asal yang menggunakan *blockchain* pribadi dan publik. Karena *blockchain* memiliki penyimpanan terbatas, rantai asal menyimpan data secara *on-chain* dan *off-chain*. Penyimpanan *on-chain* mencakup hash data sementara penyimpanan *off-chain* memiliki file mentah dan alamat kontrak pintar. Para penulis juga telah memberikan studi kasus dengan implementasi aktual dan penyebaran rantai asal di industri. Selain itu, mereka juga telah membahas kemampuan beradaptasi dari solusi dan menyimpulkan bahwa *blockchain* adalah pilihan yang baik untuk ketertelusuran di SCM. Namun, keamanan dan privasi adalah perhatian utama. Dalam hal ini, Nakasumi (2017) telah memperkenalkan keamanan informasi pangan berbasis *blockchain* di SCM. Menurut mereka, belum ada solusi yang disediakan untuk mencapai ketertelusuran. Namun, solusi ini tidak dapat mencapai keterlacakan akurat yang diperlukan untuk pasar Tiongkok. Penulis telah memberikan solusi yang lebih andal dan efisien. Namun, implementasi praktis dari seluruh solusi masih tertinggal. Mempertimbangkan masalah keamanan pangan, solusi berbasis *blockchain* dan IoT diusulkan untuk rantai pasok *agri-food* dan keamanan informasi. Mereka membuat kasus penggunaan untuk keterlacakan produk dari lahan pertanian ke atas meja makan dan membandingkan hasilnya menggunakan platform implementasi yang berbeda, yaitu Ethereum dan Hyperledger. Lin dkk. (2017) mengulas konsep teknologi informasi dan komunikasi dan *blockchain*. Mereka mengusulkan sistem e-pertanian dan alat evaluasi. Sistem ini dapat digunakan untuk mendapatkan persyaratan tertentu untuk sistem pertanian berbasis *blockchain*. Namun, sistem yang diusulkan kurang dalam hal implementasi praktis dan kelayakan penerapan di lingkungan nyata. Altawy dkk., (2018) mengusulkan mekanisme pengiriman anonimitas berbasis *blockchain* untuk item. Mereka telah mencapai anonimitas, keadilan dan *unlink ability* pembeli dan penjual. Namun, penulis mengompromikan akuntabilitas

entitas yang terlibat. Toyoda dkk. (2017) telah mengatasi masalah bagaimana mengklonimautag RFID pasca-pengiriman. Dalam hal ini, mereka menggunakan *blockchain* Bitcoin dan menerapkan *proof-of-concept*. Setelah evaluasi kinerja sistem, penulis menyimpulkan bahwa biaya pengelolaan kepemilikan produk berkurang menjadi US\$ 1 untuk hampir enam transfer.

Setelah penemuan *blockchain*, banyak sistem penyimpanan terdesentralisasi digunakan untuk menyimpan data secara terdesentralisasi. Hao dkk., (2018) mengusulkan skema penyimpanan yang efisien untuk pengemasan produk *agri-food*. Penulis menggunakan IPFS bersama dengan *database* sekunder untuk mencapai ketertelusuran. IPFS adalah jaringan yang digunakan untuk menyimpan dan berbagi data dalam sistem file yang terdesentralisasi. Untuk mengambil data dari IPFS, hash transaksi diakses dari *database* sekunder. Menggunakan *hash* transaksi itu, hash IPFS diambil dari *blockchain*. Namun, jika basis data sekunder gagal, seluruh sistem akan gagal. Caro dkk. (2018) telah mengusulkan pendekatan untuk transaksi yang efisien dari ketertelusuran kedelai dalam rantai pasokan Agri-Food. Solusi yang diusulkan mengatasi masalah berupa kebutuhan akan pihak ketiga. Ini mempertahankan integritas tinggi, keandalan, dan lebih banyak keamanan. Namun, penulis belum mempertimbangkan akuntabilitas dan kemampuan audit dari data yang dikirimkan dan pembayaran otomatis. Wang dkk. (2019) telah mengusulkan protokol yang dapat diaudit untuk transaksi yang transparan, antirusak, dan dapat diverifikasi antarentitas. Schaub dkk., (2016) telah mengusulkan sebuah pendekatan untuk sistem reputasi menjaga privasi tanpa kepercayaan. Solusi yang diusulkan mempertahankan peringkat anonim produk dan memberikan analisis kebenaran dan keamanan dari skema yang diusulkan. Namun, tidak ada analisis kinerja yang diperlukan untuk menjamin efisiensi pembuatan token. Selain itu, tidak ada hubungan antara peringkat dan transaksi dan akibatnya rentan terhadap pengguna jahat. Menyimpulkan dari literatur di atas, penggunaan *blockchain* dalam sistem rantai pasok berbasis pertanian tumbuh secara eksponensial. Teknologi ini diadopsi untuk

meningkatkan transparansi, ketertelusuran, dan masalah keamanan pangan dalam sistem rantai pasok saat ini. Oleh karena itu, bab ini menjelaskan solusi berbasis *blockchain* untuk menjaga akuntabilitas, auditabilitas, dan kredibilitas dalam sistem rantai pasok *agri-food*.

B. *Blockchain* dalam Pertanian dan Rantai Pasok Pangan

Sementara teknologi *blockchain* memperoleh kesuksesan dan membuktikan fungsinya di banyak mata uang kripto, berbagai organisasi dan entitas lain bertujuan memanfaatkan transparansi dan toleransi kesalahannya untuk memecahkan masalah dalam skenario di mana banyak aktor yang tidak dipercaya terlibat dalam distribusi beberapa produk. Dua bidang penting yang sangat relevan adalah pertanian dan rantai pasok pangan. Rantai pasok pertanian dan pangan saling terkait erat karena produk pertanian hampir selalu digunakan sebagai input dalam beberapa rantai pasok terdistribusi multiaktor, di mana konsumen biasanya merupakan klien terakhir.

Ada bukti bahwa aplikasi *blockchain* mulai digunakan dalam manajemen rantai pasok segera setelah teknologi ini muncul (Tribis dkk., 2018). *Blockchain* dalam manajemen rantai pasok diharapkan tumbuh pada tingkat pertumbuhan tahunan sebesar US\$ 3314,6 juta pada tahun 2023 (Chang dkk., 2020).

Sebagai contoh sukses, pada Desember 2016, perusahaan Agri-Digital melakukan penjualan 23,46 ton biji-bijian pertama di dunia dengan bantuan *blockchain* (ICT4Ag, 2017). Sejak itu, lebih dari 1.300 pengguna dan lebih dari 1,6 juta ton biji-bijian telah ditransaksikan melalui sistem berbasis *cloud*, yang melibatkan US\$ 360 juta dalam pembayaran petani. Keberhasilan AgriDigital menjadi inspirasi untuk potensi penggunaan teknologi ini dalam rantai pasok pertanian. Agri-Digital sekarang bertujuan untuk membangun rantai pasok pertanian yang tepercaya dan efisien melalui teknologi *blockchain* (AgriDigital, 2017). Contoh terbaru lainnya, Louis Dreyfus Co (LDC), salah satu pedagang bahan pangan terbesar di dunia, bekerja sama dengan bank

Belanda dan Prancis untuk perdagangan komoditas pertanian (yaitu kargo kedelai dari AS ke Tiongkok) dengan *blockchain* (Hoffman & Munsterman, 2018). Menurut LDC, dengan mencocokkan data secara *real-time* dan otomatis, mereka dapat menghindari duplikasi dan pemeriksaan manual, pemrosesan dokumen berkurang hingga seperlima dari waktu.

1. Ketahanan Pangan

Food and Agriculture Organization (FAO) mendefinisikan ketahanan pangan sebagai situasi ketika “semua orang, setiap saat, memiliki akses fisik, sosial dan ekonomi terhadap pangan yang cukup, aman dan bergizi yang memenuhi kebutuhan pangan dan preferensi pangan mereka untuk kehidupan yang aktif dan sehat (FAO, 2018). Upaya untuk mencapai tujuan ini telah terbukti sangat menantang di bawah krisis kemanusiaan yang terkait dengan bencana lingkungan, konflik politik, kekejaman berbasis etnis, dan lain-lain. Blockchain dianggap sebagai peluang untuk pengiriman bantuan internasional yang transparan, untuk disintermediasi proses pengiriman, membuat catatan dan aset dapat diverifikasi dan diakses hingga pada akhirnya mampu merespons lebih cepat dan efisien ketika terjadi keadaan darurat kemanusiaan. Contohnya termasuk kupon pangan digital yang telah didistribusikan kepada pengungsi Palestina di kamp Azraq Yordania, melalui *blockchain* berbasis Ethereum, di mana kupon dapat ditukarkan melalui data biometrik. Saat ini, proyek tersebut telah membantu 100.000 pengungsi.

2. Keamanan Pangan

Keamanan pangan adalah kondisi pengolahan, pengelolaan dan penyimpanan pangan dengan cara yang higienis, untuk mencegah terjadinya penyakit pada populasi manusia. Keamanan pangan dan jaminan kualitas menjadi semakin sulit di saat arus barang global meningkat (Creydt & Fischer, 2019). Pusat Pengendalian dan Pencegahan Penyakit mengklaim bahwa kontaminasi karena pangan menyebabkan

48 juta orang Amerika menjadi sakit dan 3,000 orang meninggal setiap tahun (CDC, 2018). Pada tahun 2016, Oceana melakukan penelitian tentang penipuan pangan laut, menunjukkan bahwa 20% pangan laut diberi label yang salah (Oceana, 2013). Rantai pasok pangan ditandai dengan berkurangnya kepercayaan, jarak pengiriman yang jauh, kompleksitas yang tinggi, dan waktu pemrosesan yang besar. *Blockchain* dapat memberikan solusi yang efisien dalam kebutuhan mendesak untuk ketertelusuran pangan yang lebih baik terkait keamanan dan transparansinya. Pencatatan informasi tentang produk pangan di setiap tahap rantai pasok memungkinkan untuk memastikan kondisi higienis, mengidentifikasi produk yang terkontaminasi, penipuan, dan risiko sedini mungkin.

Walmart dan Kroger adalah perusahaan pertama yang merangkul *blockchain* dan memasukkan teknologi tersebut ke dalam rantai pasok mereka. Terdapat sebuah studi kasus yang berfokus pada distribusi daging babi Tiongkok dan mangga Meksiko (Kamath, 2018). Hasil awal dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa, ketika melacak paket mangga dari supermarket ke lahan pertanian tempat mereka ditanam, dibutuhkan 6,5 hari untuk mengidentifikasi asal dan jalur buah yang diikuti dengan metode tradisional, sedangkan dengan *blockchain* informasi ini tersedia hanya dalam beberapa detik.

Integrasi *blockchain* dengan *Internet of Thing* (IoT) untuk pemantauan data fisik dan penelusuran *real-time* berdasarkan HACCP baru-baru ini telah direkomendasikan. Hal ini sangat penting untuk pemeliharaan rantai dingin dalam distribusi logistik produk pangan yang mudah rusak. Sebagai contoh, ZetoChain melakukan pemantauan lingkungan di setiap tautan rantai dingin berdasarkan perangkat IoT. Masalah diidentifikasi secara *real-time* dan pihak yang terlibat segera diberi tahu untuk mengambil tindakan cepat. Kontrak pintar dimanfaatkan untuk meningkatkan keamanan penjualan dan pengiriman barang. Aplikasi seluler dapat digunakan oleh konsumen untuk memindai label Zeto pada produk untuk menemukan riwayat produk.

3. Integritas Pangan

Integritas pangan adalah tentang pertukaran pangan yang andal dalam rantai pasok. Setiap pelaku harus menyampaikan rincian lengkap tentang asal barang. Masalah ini menjadi perhatian besar di Tiongkok, di mana pertumbuhan yang sangat cepat telah menciptakan masalah transparansi yang serius. Keamanan dan integritas pangan dapat ditingkatkan melalui ketertelusuran yang lebih tinggi. Melalui *blockchain*, perusahaan pangan dapat mengurangi penipuan pangan dengan mengidentifikasi dan menghubungkan wabah kembali ke sumber spesifik mereka. Ada banyak contoh perusahaan, *start-up* dan inisiatif yang bertujuan untuk meningkatkan integritas rantai pasok pangan melalui teknologi *blockchain*.

Konglomerasi pertanian Cargill Inc. memiliki tujuan untuk memanfaatkan *blockchain* agar pembeli dapat melacak kalkun mereka dari toko ke peternakan yang membesarkan mereka. Baru-baru ini, kalkun dan kesejahteraan hewan dipertimbangkan pada percontohan yang melibatkan *blockchain*. Toko kelontong Eropa Carrefour menggunakan *blockchain* untuk memverifikasi standar dan melacak asal pangan dalam berbagai kategori, meliputi daging, ikan, buah-buahan, sayuran, dan produk susu.

Bir Downstream adalah perusahaan pertama di sektor bir yang menggunakan teknologi *blockchain*, mengungkapkan semua yang ingin diketahui orang tentang bir, yaitu bahan dan metode pembuatannya. Setiap aspek dari bir ini direkam dan ditulis ke *blockchain* sebagai jaminan transparansi dan keaslian. Konsumen dapat menggunakan ponsel pintar mereka untuk memindai kode QR di bagian depan botol dan mereka kemudian dibawa ke situs web di mana mereka dapat menemukan informasi yang relevan, dari bahan mentah hingga pembotolan.

Mengenai produksi daging, “*Paddock to Plate*” adalah proyek penelitian yang bertujuan untuk melacak daging sapi di sepanjang rantai produksi-konsumsi, meningkatkan reputasi kualitas tinggi Australia. Proyek ini menggunakan BeefLedger sebagai platform teknologinya.

Sebagai contoh lain, platform *e-commerce* JD.com memantau daging sapi yang diproduksi di Mongolia yang didistribusikan ke berbagai provinsi di Tiongkok. Dengan memindai kode QR, seseorang dapat melihat detail tentang hewan, nutrisi, tanggal pembelian dan pengemasan daging, serta hasil tes keamanan pangan. Untuk menjamin konsumen bahwa ayam-ayamnya benar-benar baik, perusahaan Gogochicken menggunakan gelang kaki untuk memantau pergerakan dan perilaku ayam melalui pelacakan GPS, dan informasi ini kemudian tersedia melalui web. Tujuan perusahaan adalah untuk membangun kepercayaan dengan mendokumentasikan asal-usul pangan. Saat ini, 100.000 ayam telah dilengkapi dengan gelang GPS, tetapi perusahaan yang berbasis di Shanghai berencana untuk memasukkan sekitar 23 juta ayam ke dalam proyek selama tiga tahun ke depan.

The Grass Roots Farmers Cooperative menjual kotak langganan daging yang menggunakan teknologi *blockchain* untuk menginformasikan konsumen dengan cara yang dapat diandalkan tentang kondisi pemeliharaan hewan mereka. Dalam uji coba yang dilakukan, kotak-kotak ayam yang didistribusikan di San Francisco diberi label dengan kode QR yang menautkan ke data daging yang ada di dalamnya.

Selain itu, pada April 2017, Intel mendemonstrasikan bagaimana Hyperledger Sawtooth, sebuah platform untuk membuat dan mengelola *blockchain*, dapat memfasilitasi keterlacakan pada rantai pasok pangan laut. Penelitian ini menggunakan peralatan sensorik untuk merekam informasi tentang lokasi ikan dan kondisi penyimpanan. Hyperledger adalah salah satu inisiatif terpenting, berdasarkan kelengkapan dan kualitas layanan dan alat, serta ukuran komunitas pendukung dan pentingnya anggota yang mendukung keseluruhan proyek. Hyperledger bertujuan untuk menawarkan solusi lengkap terhadap penggunaan bisnis dari *blockchain*, dan telah diusulkan dalam upaya penelitian terbaru seperti AgriBlockIoT (Caro dkk., 2018). Hyperledger berfokus pada pembuatan kerangka kerja open source berdasarkan DLT, cocok untuk solusi perusahaan. Dua dari kerangka Hyperledger paling matang diberi nama Fabric (untuk jaringan *block-*

chain yang diizinkan) dan Sawtooth (untuk jaringan *blockchain* yang diizinkan dan tidak diizinkan). Kedua kerangka kerja ini merupakan perangkat lunak tingkat perusahaan generik, menawarkan dukungan untuk berbagai bahasa kontrak pintar dan digunakan oleh komunitas luas perusahaan, pengembang, dan pengguna. Secara khusus, Hyperledger Fabric didukung oleh IBM. Sementara Hyperledger Fabric adalah yang paling terkenal dan tersebar luas, Sawtooth adalah yang paling canggih dan tangguh, memungkinkan integrasi yang memadai dengan kerangka kerja *blockchain* lainnya. Mauanuari (2018), World Wildlife Foundation (WWF) mengumumkan Proyek Keterlacakan Rantai Pasok *Blockchain*, untuk menghilangkan penangkapan ikan tuna ilegal melalui *blockchain*. Melalui proyek tersebut, nelayan dapat mendaftarkan tangkapan mereka di *blockchain* melalui *e-tagging* RFID dan pemindaian ikan. Selain itu, ketertelusuran tuna juga menjadi fokus Balfegó.

Selanjutnya, ripe.io telah menciptakan Blockchain of Food yang merupakan jaringan kualitas pangan yang memetakan perjalanan pangan dari produksi sampai ke piring kita. Ripe.io baru-baru ini mengumpulkan US\$ 2,4 juta dalam pendanaan awal dalam putaran yang dipimpin oleh cabang perusahaan logistik kontainer global Maersk (AgFunder News, 2018).

Melalui layanan yang disediakan oleh perusahaan OriginTrail, konsumen dapat melihat dari kebun dan peternakan mana bahan-bahan yang mereka konsumsi itu tumbuh, asal dan kondisi pertumbuhan unggas, dll. Juga, proyek “*Blockchain for Agri-Food*” mengembangkan aplikasi berbasis *blockchain* proof-of-concept tentang anggur meja dari Afrika Selatan. Nestle baru-baru ini memasuki kemitraan IBM Food Trust menuju keterlacakan pangan (ITUNews, 2018), dengan percontohan berdasarkan labu dan mangga kalengan.

Terakhir, teknologi *blockchain* juga sedang dinilai untuk melacak produksi tanaman yang tidak dapat dimakan yang juga sangat sensitif terhadap masalah integritas karena aspek regulasi dan hukum. Figorilli dkk. (2018) bereksperimen dengan implementasi *blockchain* untuk ketertelusuran elektronik kayu dari pohon ke konsumen akhir,

berdasarkan sensor RFID dan teknologi *open source*. Kanada saat ini sedang mengembangkan jaringan *blockchain* legal untuk melacak rantai pasok ganja (Abelseth, 2018). Dengan melacak rantai ganja, Health Canada memiliki tujuan untuk menegakkan peraturan dengan lebih mudah.

4. Dukungan pada Petani Kecil

Koperasi petani kecil merupakan salah satu cara untuk meningkatkan daya saing di negara berkembang. Melalui koperasi, petani individu dapat memperoleh bagian yang lebih besar dari nilai tanaman yang mereka tanam. FarmShare bertujuan untuk menciptakan bentuk baru kepemilikan properti, kerja sama masyarakat dan ekonomi lokal mandiri. Usaha ini merupakan evolusi dari model pertanian yang didukung masyarakat, mengambil keuntungan dari potensi *blockchain* untuk konsensus terdistribusi, saham ekuitas berbasis token dan tata kelola otomatis untuk mendorong keterlibatan masyarakat yang lebih besar sambil menghilangkan beberapa beban manajerial.

AgriLedger menggunakan buku besar kripto terdistribusi untuk meningkatkan kepercayaan di antara koperasi kecil di Afrika. Pendekatan baru yang mengarah pada aplikasi dan layanan koperasi terpercaya dalam rantai pertanian pangan, di antara petani dan entitas lain dalam rantai menjadi penting untuk diterapkan. OlivaCoin adalah platform B2B untuk perdagangan minyak zaitun, mendukung pasar minyak zaitun, untuk mengurangi biaya keuangan secara keseluruhan, meningkatkan transparansi, dan mendapatkan akses yang lebih mudah ke pasar global.

Selanjutnya, beberapa *start-up* mendukung petani kecil dengan menawarkan alat yang meningkatkan keterlacakan barang, seperti Provenance, Arc-Net, Bart, Digital dan Bext360. Sebagai contoh baru-baru ini, Soil Association Certification telah bekerja sama dengan Provenance untuk merintis teknologi yang melacak perjalanan pangan organik.

Kita bisa mencatat di sini bahwa bahkan petani kecil memiliki potensi mengambil manfaat dari *blockchain* dan banyak inisiatif yang

disebutkan di atas karena mereka membentuk kategori yang jelas berbeda dari perusahaan besar. Koperasi, di sisi lain, dapat dibentuk oleh petani kecil atau menengah, dan dapat menjadi entitas yang cukup besar yang mewakili puluhan atau ratusan petani. *Blockchain* bisa sangat berguna untuk koperasi semacam itu, karena transparansi informasi yang terlibat dapat membantu menyelesaikan perselisihan dan konflik di antara para petani dengan cara yang lebih adil untuk semua orang.

Blockchain juga dapat memfasilitasi program asuransi untuk menjamin keamanan petani (sebagai anggota koperasi) terhadap kondisi cuaca yang tidak terduga yang memengaruhi tanaman mereka atau risiko lain seperti bencana alam. Gagasan di balik proyek ARBOL adalah melalui kesepakatan yang disesuaikan, petani dapat menerima pembayaran untuk kekeringan, banjir, atau dampak cuaca buruk lainnya yang berakibat negatif pada tanaman mereka.

5. Pengurangan Sampah dan Kesadaran Lingkungan

Berbagai inisiatif pengelolaan limbah telah melibatkan teknologi *blockchain*. Layak disebut seperti Plastic Bank, sebuah usaha daur ulang global yang didirikan di Kanada untuk mengurangi sampah plastik di negara-negara berkembang—sejauh ini Haiti, Peru, dan Kolombia, dengan rencana perluasan ke Indonesia dan Filipina. Inisiatif ini memberi penghargaan kepada orang-orang yang membawa sampah plastik ke pusat daur ulang, dan hadiah ini diberikan melalui token digital yang diamankan dengan *blockchain*. Dengan token ini, orang dapat membeli barang-barang seperti makanan menggunakan aplikasi Plastic Bank. Inisiatif Plastic Bank tampaknya berhasil sampai saat ini, dengan lebih dari satu juta peserta, lebih dari 2.000 unit pengumpul dan 3 juta kilogram plastik dikumpulkan di Haiti sejak 2014. Perusahaan dengan misi yang mirip dengan Plastic Bank adalah Agora Tech Lab yang bertujuan untuk mempromosikan inisiatif ekonomi sirkular dengan menghargai perilaku yang bertanggung jawab.

Contoh lain penggunaan teknologi *blockchain* muncul di stasiun kereta api. Pengelolaan sampah di stasiun-stasiun Prancis secara tradisional kacau balau, dengan ratusan ton sampah dihasilkan setiap tahun. Sistem yang dikembangkan oleh anak perusahaan SNCF, Arep, menggunakan *blockchain* untuk memungkinkan pengumpulan informasi terperinci, menggunakan Bluetooth untuk terus memperbarui jumlah setiap jenis sampah yang dikumpulkan oleh pengelola sampah, dan bagaimana pemindahannya (SNCF, 2017). *Blockchain* digunakan untuk merekam setiap tindakan yang diambil dan proses pengumpulan secara keseluruhan.

Solusi komersial lainnya menggunakan *blockchain* untuk meningkatkan daur ulang dan pemilahan sampah yang dihasilkan di sepanjang rantai pangan termasuk Recereum dan Swachhcoin. Akhirnya, *blockchain* dapat membantu meningkatkan kesadaran tentang karakteristik lingkungan dari pangan yang diproduksi. Masalah krusial di sini adalah degradasi tanah dan air tempat pangan diproduksi. Secara khusus, kualitas tanah penting untuk mewujudkan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB) Perserikatan Bangsa-Bangsa. Dalam konteks ini, pembangunan berkelanjutan, pengelolaan dan penggunaan lahan pertanian yang tepat, sumber daya air dan tanah secara rasional adalah yang paling penting. Menelusuri informasi ini melalui rantai pasok dan membuatnya terlihat oleh publik sangat penting untuk memberikan tekanan publik kepada produsen dan pembuat kebijakan tentang aspek bagaimana pangan diproduksi secara berkelanjutan.

6. Manajemen dan Pengawasan

Teknologi *Blockchain* juga dapat dimanfaatkan sebagai sistem evaluasi kredit untuk memperkuat efektivitas pengawasan dan manajemen dalam rantai pasok pangan. *Blockchain* juga dapat digunakan untuk meningkatkan pemantauan perjanjian internasional yang relevan dengan pertanian, seperti perjanjian Organisasi Perdagangan Dunia dan Perjanjian Paris tentang Perubahan Iklim. Mao dkk. (2018) telah mengembangkan sistem berdasarkan *blockchain* Hyperledger yang

mengumpulkan teks evaluasi kredit dari pedagang dengan kontrak pintar di *blockchain*. Kredit pedagang kemudian dapat digunakan sebagai referensi bagi regulator untuk menilai kredibilitas mereka. Dengan menerapkan *blockchain*, pedagang dapat dimintai pertanggungjawaban atas tindakan mereka dalam proses transaksi dan evaluasi kredit oleh regulator. Sebagai contoh lain, AgriBlockIoT adalah solusi berbasis *blockchain* yang sepenuhnya terdesentralisasi untuk manajemen rantai pasok pertanian pangan (Caro dkk., 2018), yang mampu mengintegrasikan perangkat IoT yang memproduksi dan menggunakan data digital di sepanjang rantai.

Kontrak berbasis *blockchain* juga dapat memitigasi eksploitasi tenaga kerja di bidang pertanian, melindungi pekerja dengan perjanjian sementara dan hubungan kerja di sektor pertanian. Ketika perjanjian kerja menjadi bagian dari *blockchain*, lebih mudah bagi pihak berwenang untuk mengontrol keadilan dalam pembayaran dan perpajakan. Coca-Cola telah berusaha menggunakan *blockchain* untuk mengendus kerja paksa di sektor tebu (Gertrude dkk., 2018).

Pengukuran dan pemantauan kualitas juga merupakan aspek penting, di mana jaminan kualitas didefinisikan sebagai penghindaran kegagalan seperti keterlambatan ke tujuan akhir, pemantauan yang buruk, dan penipuan, serta jaminan bahwa kualitas produk (misalnya tanaman, daging, susu) dipertahankan dengan baik sepanjang perpindahan produk melalui rantai pangan, yaitu kondisi penyimpanan yang baik, tidak ada kontaminasi atau kotoran. Hasil penelitian awal oleh Lucena dkk. (2018) mendukung permintaan potensial untuk sertifikasi berbasis *blockchain*, yang akan mengarah pada penilaian tambahan dari harga jualn sekitar 15% untuk kedelai bebas rekayasa genetika di lingkup jaringan bisnis untuk ekspor biji-bijian di Brasil. Penilaian tambahan ini akan menjadi hasil dari proses jaminan kualitas yang lebih andal dan efisien pada biji-bijian yang difasilitasi oleh *blockchain*. *Blockchain* juga digunakan untuk merekam peristiwa yang terjadi dalam rantai nilai beras, memastikan keamanan dan kualitas beras dalam proses transportasi (Kumar & Iyengar, 2017).

C. Model Sistem

Bagian ini menjelaskan solusi yang diusulkan oleh Shahid dkk. (2020). Mereka telah menyediakan skema ketertelusuran untuk melacak produk Agri-Food secara digital dari asal hingga konsumen akhir. Sistem ini memperkenalkan mekanisme perdagangan dan pengiriman untuk memungkinkan perdagangan yang aman antara entitas rantai pasok Agri-Food. Sistem reputasi juga digunakan untuk jaminan kredibilitas entitas ini. Model yang diusulkan mengikuti arsitektur berlapis dan dikategorikan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama, yaitu lapisan data, menangani interaksi antara entitas rantai pasok agro-pangan. Interaksi ini melibatkan perdagangan produk bersama dengan bukti pengiriman yang dapat diaudit. Lapisan kedua adalah lapisan *blockchain* yang menangani data transaksional dari peristiwa perdagangan dan pengiriman. Juga, lapisan melacak reputasi entitas yang terlibat dalam sistem. Untuk meningkatkan kemampuan penyimpanan, lapisan *blockchain* hanya menyimpan *hash data* dan data aktual disimpan di lapisan ketiga, yaitu lapisan penyimpanan. Lapisan *blockchain* memberlakukan strategi kontrol akses yang ketat untuk mencegah pembacaan dan penulisan yang tidak sah ke lapisan penyimpanan. Lapisan ketiga pada dasarnya bertanggung jawab penuh untuk menyimpan data transaksi di IPFS. Mengingat IPFS adalah media penyimpanan terdesentralisasi, ia memanfaatkan sistem yang diusulkan dengan *throughput* tinggi, latensi rendah, dan skalabilitas.

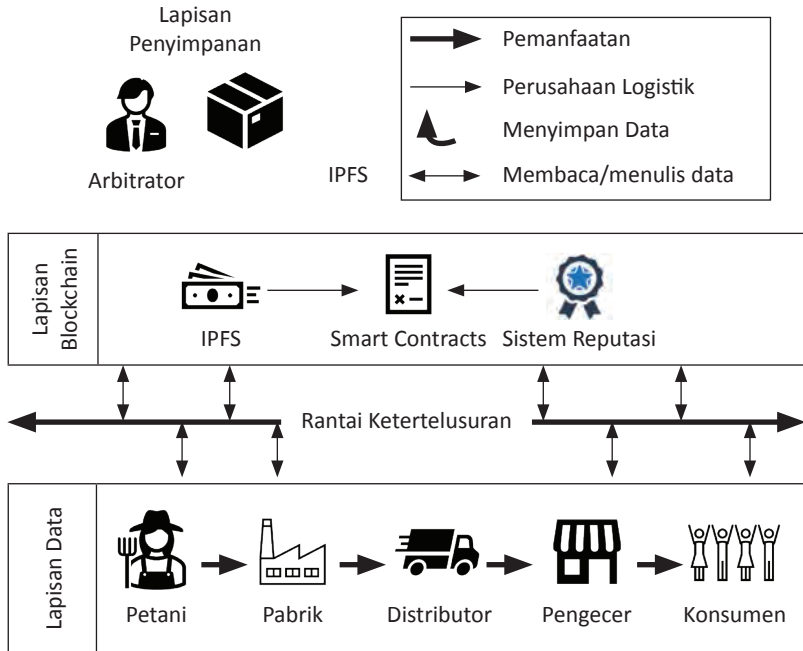
Bagian di bawah ini menguraikan bagaimana sistem yang diusulkan mencapai ketertelusuran. Shahid dkk. (2020) menjelaskan peristiwa perdagangan antara entitas rantai pasok *agri-food* dan mekanisme pengiriman yang menyediakan pengiriman produk yang dapat diaudit. Terakhir, mereka menentukan bagaimana sistem reputasi bekerja dan menguntungkan sistem yang diusulkan.

1. Ketertelusuran

Sistem rantai pasok melibatkan sejumlah besar entitas untuk melakukan seluruh proses produksi dan transportasi produk *agri-food*

dari asal ke konsumen akhir. Oleh karena itu, sulit untuk melacak seluruh proses. Untuk mencapai ketertelusuran lengkap, mencatat transaksi perdagangan, menambahkan identitas unik produk dan nomor lot ke setiap transaksi dan mencatat hash untuk mempertahankan rantai hash. Lot adalah sekelompok produk yang akan diperdagangkan di gudang dan nomor lot adalah pengidentifikasi unik untuk kelompok produk ini. Untuk memelihara rantai hash, data transaksional disimpan dalam IPFS. Hash data dicatat dalam *blockchain* ethereum yang mengatasi batasan IPFS. Untuk menulis atau mengakses data dari *blockchain*, strategi kontrol akses diterapkan yang memastikan privasi dan kerahasiaan dalam jaringan. Strategi kontrol akses memastikan bahwa transaksi dilakukan oleh pengguna yang berwenang. Hanya pengguna terdaftar yang diizinkan untuk melakukan transaksi tertentu. Selain itu, setiap fungsi dalam kontrak pintar diizinkan untuk dieksekusi oleh entitas tertentu. Tidak ada entitas yang tidak berwenang yang diizinkan untuk melakukan tugas apa pun. Beberapa entitas rantai pasok terdaftar dalam sistem yang berinteraksi melalui kontrak pintar, algoritma 1 mewakili proses pendaftaran entitas. Proses ini, mengambil *entityAddress* dan *entityType* sebagai parameter input dan sebagai hasilnya, mendaftarkan entitas masing-masing sebagai pengguna resmi sistem. Entitas ini adalah bagian dari lapisan data dan dijelaskan pada Gambar 5.1.

- 1) Petani: seorang petani adalah entitas pertama dalam rantai pasok *agri-food* dan merupakan orang pertama yang menggunakan kontrak pintar untuk perdagangan. Petani menghasilkan sejumlah besar tanaman dan bertanggung jawab untuk memastikan dan memantau detail pertumbuhan tanaman. Dia menjual hasil panen ini ke pengolah/pabrik.
- 2) Pengolah: seorang pengolah membeli hasil panen dari petani. Dia bertanggung jawab untuk menghilangkan bahan tambahan dari tanaman dan mengubahnya menjadi produk akhir. Pengolah menjual produk akhir ini ke distributor.



Sumber: Shahid dkk. (2021)

Gambar 5.1 Solusi Ujung ke Ujung Berbasis Blockchain untuk Rantai Pasok Agri-food

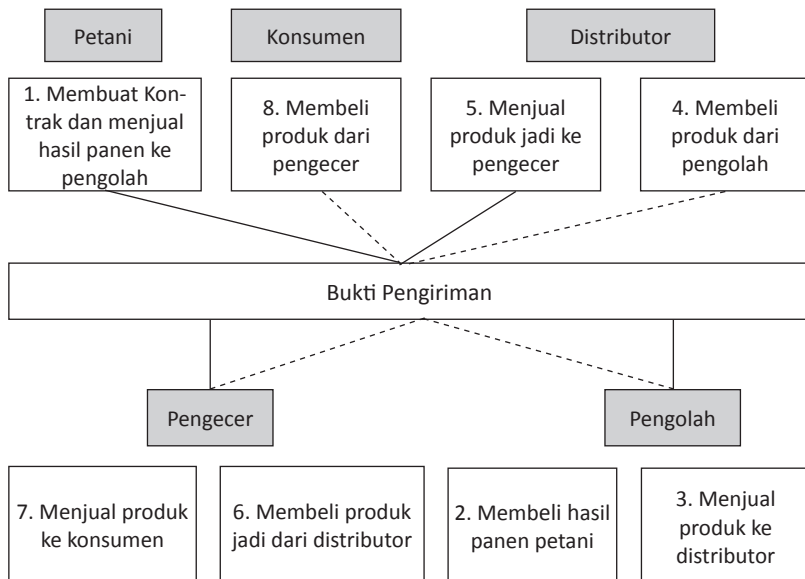
- 3) Distributor: distributor memelihara gudang dengan membeli produk akhir dari pengolah dan bertanggung jawab untuk menjualnya ke pengecer.
- 4) Pengecer: pengecer membeli produk jadi yang dapat dilacak dari distributor dan menjualnya kepada konsumen dalam jumlah yang lebih kecil. Produk yang dapat dilacak mengacu pada pengidentifikasi khusus barang yang memungkinkan pelacakan data asalnya.
- 5) Konsumen: konsumen adalah pengguna akhir yang membeli dan mengonsumsi produk dari pengecer. Seorang konsumen menilai kredibilitas penjual melalui sistem reputasi sebelum membeli produk.

- 6) Perusahaan logistik: Perusahaan logistik bertanggung jawab atas pengiriman produk yang dapat diaudit dari produsen produk ke pembeli.
- 7) Arbitrator: arbitrator adalah entitas *off-chain* yang dipilih untuk memantau dan mengelola seluruh jaringan. Selain itu, ia juga bertindak sebagai penanganan perselisihan.

2. Perdagangan dan Pengiriman

Sebelum membahas mekanisme perdagangan dan pengiriman, mari pertimbangkan skenario ketika konsumen akhir belum memulai transaksi dan ingin mengetahui reputasi pasar pedagang. Untuk tujuan ini, sistem reputasi diusulkan seperti yang dijelaskan dalam bagian c. Sistem ini memastikan bahwa pemilik produk cukup andal untuk dipercaya. Selanjutnya, untuk pengiriman produk dari satu entitas ke entitas lain, dipastikan seluruh proses dapat dilacak dengan merekam informasi di *blockchain*. Ini memastikan pengiriman yang dapat diaudit ke konsumen akhir. Ada tiga entitas utama yang terlibat dalam mekanisme perdagangan dan pengiriman, yaitu pemilik produk, perusahaan logistik dan pembeli. Pemilik produk adalah orang yang menjual produk dalam rantai pasok; perusahaan logistik adalah jasa kurir yang mentransfer barang; dan pembeli, seperti yang digambarkan oleh namanya, adalah orang yang ingin menghabiskan uang untuk membeli suatu produk. Perusahaan logistik seperti yang disebutkan sebelumnya adalah entitas terdaftar dari sistem. Jika terjadi perselisihan selama transaksi, arbitrator bertanggung jawab atas penyelesaian perselisihan secara *off-chain*. Gambar 5.2 mewakili model perdagangan dan pengiriman.

Untuk melakukan proses perdagangan, pertama-tama, entitas perdagangan mendaftar ke kontrak pintar, misalnya, RC dan diautentikasi menggunakan alamat *ethereum* mereka. Setelah itu, kontrak antara pemilik produk dan pembeli dimulai. Di sini, pembeli memilih produk dan memasukkan kodenya, contohnya P1, yang digunakan sebagai pengenal unik untuk produk tersebut dan digunakan oleh



Sumber: Shahid dkk. (2021)

Gambar 5.2 Mekanisme Perdagangan dan Pengiriman

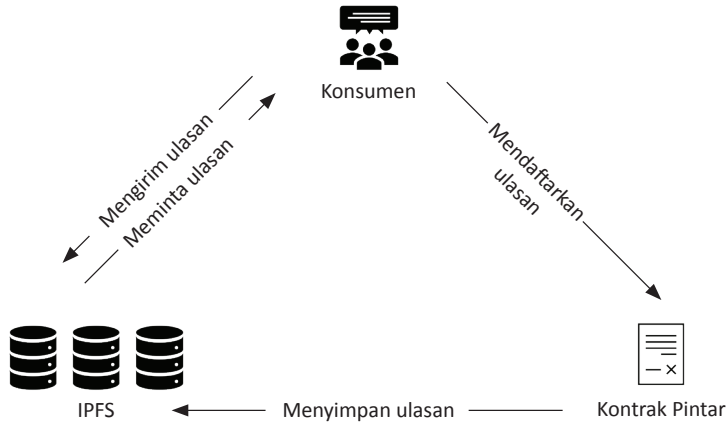
perusahaan logistik. Kode produk beserta detail produk dikirimkan ke pemilik produk. Selain itu, detail produk, berisi pemilik produk, gambar, dan harga diunggah ke IPFS dan sebagai imbalannya, hash IPFS diterima. *Hash* ini membantu dalam membuktikan keaslian produk yang ditransfer. Setelah menerima produk, pembeli mengkonfirmasi pengiriman yang berhasil dan perusahaan logistik akan dibayar. Selanjutnya, untuk mengkonfirmasi transaksi perdagangan, kedua belah pihak membayar sejumlah uang jaminan ke dalam kontrak. Penyetoran jumlah yang jatuh tempo bersama dengan denda untuk memastikan keberhasilan penyelesaian proses perdagangan dan pengiriman. Jumlah denda tambahan menjadi bentuk hukuman oleh arbitrator jika terjadi perselisihan. Setelah transaksi dikonfirmasi, pembeli menyerahkan jumlah pembayarannya kepada pemilik produk. Jika terjadi perselisihan, semua dana ditransfer ke rekening

arbitrator dan didistribusikan sesuai dengan penyelesaian perselisihan secara *off-chain*.

Selanjutnya, setelah transaksi lengkap antara pemilik produk dan pembeli, kontrak pintar antara pemilik produk dan perusahaan logistik dimulai. Kontrak ini mengatur pengangkutan produk dari satu lokasi ke lokasi lain. Proses ini juga mengumpulkan jaminan transportasi dari kedua belah pihak, yaitu pemilik produk dan pembeli. Jumlah keamanan ini dikumpulkan dari kedua belah pihak untuk menghindari ketakutan akan manipulasi. Ketika sebuah perusahaan logistik mengumpulkan produk untuk pengiriman, proses pra-verifikasi dilakukan. Dalam proses ini, *hash* IPFS digunakan untuk mengakses detail produk dan mencocokkannya dengan produk sebenarnya. Proses ini memastikan bahwa perusahaan logistik tidak mengubah produk selama proses pengiriman. Dengan demikian, keaslian produk juga terjamin.

3. Sistem Reputasi

Sistem reputasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.3, diperkenalkan di lapisan *blockchain* dari model yang diilustrasikan. Sistem reputasi bertanggung jawab untuk memastikan kredibilitas pemilik produk dan produk yang dikirimkan. Sistem reputasi mempertahankan kekekalan dan integritas ulasan yang terdaftar dalam sistem. Berbeda dengan sistem reputasi tradisional, ulasan dicatat dalam IPFS sementara *hash*-nya disimpan di *blockchain*. Dengan cara ini, kekekalan dan integritas ulasan dipertahankan. Kontrak reputasi dipicu setelah peristiwa perdagangan terjadi antara pembeli dan penjual. Sistem yang diusulkan bertanggung jawab untuk menerapkan kontrak cerdas dalam memberikan ulasan berbasis layanan kepada penjual. Setelah transaksi selesai, pembeli mendaftarkan ulasan. Untuk transaksi berikutnya, pembeli meminta ulasan penjual dan melakukan transaksi berdasarkan ulasan tersebut. Selain itu, entitas perdagangan dalam solusi yang diusulkan bertindak sebagai penjual dan pembeli kecuali petani dan konsumen akhir. Misalnya, pengecer seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.1, membeli produk akhir dari distributor



Sumber: Shahid dkk. (2021)

Gambar 5.3 Sistem Reputasi

dan menjualnya kepada konsumen akhir. Demikian pula, pengolah membeli hasil panen dari petani dan setelah diproses, menjual produk akhir ke distributor. Istilah penjual dan pemilik produk, serta pembeli digunakan secara bergantian di seluruh dokumen.

Sistem reputasi memberikan nilai kepercayaan kepada penjual untuk meningkatkan kepercayaan di antara entitas perdagangan. Setiap kali suatu entitas membeli produk dari pemilik produk, ia memutuskan pemberian peringkat dan memberikan ulasan untuk pemilik produk. Nilai kepercayaan adalah penilaian kualitas layanan yang diberikan oleh penjual. Reputasi suatu entitas meningkat atau menurun berdasarkan nilai kepercayaan yang disimpan dalam rantai pasok berbasis *blockchain*. Ketika nilai kepercayaan seorang penjual tinggi, berarti penjual tersebut sangat dapat dipercaya. Selain itu, berdasarkan nilai kepercayaan penjual, pembeli memutuskan apakah pemilik produk dapat diandalkan atau tidak. Namun, penjual mungkin memiliki beberapa peringkat positif dan negatif. Oleh karena itu, nilai kepercayaan pada solusi yang diusulkan dihitung menggunakan Persamaan (1).

Buku ini tidak diperjualbelikan.

$$\text{Nilai kepercayaan} = \sum \frac{\text{Nilai}}{\text{total ulasan}} \quad (1)$$

Sistem yang diusulkan juga memastikan kepercayaan di antara entitas perdagangan dan memastikan bahwa pembeli mengetahui reputasi sebelum membeli produk dari penjual. Setiap kali entitas menandatangani kontrak pintar untuk perdagangan, kontrak pintar untuk reputasi menyediakan ulasan penjual. Setelah perdagangan berhasil dilakukan, pembeli juga mendaftarkan ulasan untuk penjual berdasarkan produk yang diterima. Ulasan yang didaftarkan oleh pembeli kemudian disimpan terhadap profil penjual dalam sistem *blockchain*. Kontrak pintar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.3 menggunakan empat fungsi, yaitu, Mendaftarkan Ulasan (*Register Review*), *Search Review*, Menyimpan Ulasan (*Save Review*), Mengirim Ulasan (*Send Review*), dan Meminta Ulasan (*Request Review*). Kelima fungsi ini masing-masing bertanggung jawab untuk mendaftarkan, memeriksa konten, memastikan adanya ulasan, menyimpan, mengirim, dan meminta ulasan baru. Fungsi Mendaftarkan Ulasan (*Register Review*) mengambil metadata, peringkat aset, dan detail ulasan sebagai masukan. Nilai-nilai ini kemudian digunakan oleh konsumen akhir untuk mengevaluasi kualitas produk dan reputasi pemilik produk.

4. Penggunaan Kontrak Cerdas

Kontrak tradisional tidak efisien untuk teknologi *blockchain*. Juga rantai pasok tradisional terdiri dari sejumlah besar dokumen kertas yang dapat mengakibatkan efisiensi yang lebih rendah selama pelacakan dan rentan pencurian.

Blockchain dapat membantu mengatasi kelemahan transparansi, efisiensi, keamanan, dan pelacakan ini dengan kontrak pintar yang secara otomatis diaktifkan ketika kondisi yang telah ditentukan terpenuhi. Kontrak pintar menghilangkan atau secara drastis mengurangi peran perantara. Kontrak pintar adalah kontrak digital yang dijalankan sendiri ketika kondisi yang telah ditentukan terpenuhi. Kontrak berbasis kode yang dijalankan sendiri ini memungkinkan

tindakan yang disepakati (seperti pembayaran) terjadi secara spontan, segera dan tanpa perantara, setelah persyaratan kontrak dipenuhi. Ini adalah salah satu fungsi utama yang membedakan *ethereum* dari *blockchain* lainnya, misalnya, kontrak pintar akan merilis pembayaran ke operator saat pelanggan mengonfirmasi paket mereka. Kontrak pintar menjadi istimewa karena seseorang dapat memprogram kode yang dijalankan sendiri dan tidak diperlukan pihak ketiga untuk itu. Ini membantu mengurangi banyak waktu, tenaga, dan uang. Dan ada penggunaan siapa saja untuk memfasilitasi transaksi serta tidak ada kemungkinan kesalahan atau penipuan pengguna.

Kontrak pintar adalah janji di antara pihak-pihak yang terlibat dalam transaksi yang memegang otoritas setiap pihak atas peran mereka dalam transaksi ke kontrak tradisional dan memastikan bahwa kontrak tersebut ditegakkan. Kontrak pintar meningkatkan transparansi, ketertelusuran, dan efektivitas rantai pasok yang memungkinkannya lebih gesit dalam memperkuat hubungan di antara para pihak. Setiap kontrak pintar diberikan dengan alamat unik 20 *byte*. Kode kontrak tidak pernah dapat diubah setelah kontrak disebarkan ke *blockchain*, pengguna hanya dapat mengirim transaksi ke alamat kontrak. Transaksi ini kemudian akan dieksekusi oleh setiap node konsensus dalam jaringan untuk mencapai konsensus pada *output*-nya. Ada dua jenis kontrak pintar, deterministik dan nondeterministik. Kontrak cerdas deterministik adalah ketika eksekusinya tidak memerlukan informasi apa pun dari pihak eksternal. Kontrak cerdas non-deterministik adalah kontrak yang bergantung pada informasi (basis data) dari pihak eksternal.

D. Implikasi Manajerial

Implementasi praktis dari sistem rantai pasok *agri-food* berbasis *blockchain* yang diusulkan akan memperkuat informasi keterlacakan produk pertanian dan pangan. Semua aspek penting dari sistem rantai pasok yang aman dan efisien dipertimbangkan dan diuraikan sebagai berikut:

1. Akuntabilitas

Dengan menerapkan *blockchain* dalam skema yang diusulkan, desentralisasi lengkap bisa tercapai. Ini memastikan akuntabilitas semua tindakan dengan menganalisis log. Dalam hal ini, solusi yang diusulkan memungkinkan arbitrator untuk menjadi bagian dari sistem dan menganalisis log jika terjadi perselisihan. Regulator memiliki akses ke data *blockchain* dan dapat mengambil informasi yang diperlukan untuk memberikan bukti pertanggungjawaban. Selain itu, node jahat tidak dapat berhasil melakukan tindakan jahat karena node dilindungi dengan skema tanda tangan standar dan node tidak mungkin menolak tindakan mereka.

2. Kredibilitas

Kredibilitas sistem dianalisis berdasarkan tingkat kepercayaan di antara entitas sistem. Solusi yang diusulkan; berisi sistem reputasi yang bertanggung jawab untuk menjaga kepercayaan antara entitas seperti pemilik produk, pembeli, perusahaan logistik, dll. Selain itu, memanfaatkan sifat bawaan *blockchain*, solusi yang diusulkan diharapkan kredibel dan aman. Peretas tidak dapat meretas sistem yang diusulkan selama mereka menempati lebih dari 51% dari semua node.

3. Kemampuan Audit

Sistem yang lengkap dapat diaudit oleh pengguna sistem yang sah. Hal ini menyediakan kontrak pintar yang dapat dilacak untuk melacak transaksi dan peristiwa yang terjadi. *Blockchain* memberikan manfaat seperti transparansi, kekekalan, dan keterlacakan. Cara ini memastikan bahwa transaksi tidak dapat dipalsukan.

4. Otonomi

Semua transaksi dan pertukaran data dalam solusi yang diusulkan berlangsung menggunakan kontrak pintar dan mencegah segala jenis gangguan eksternal. Oleh karena itu, ini memastikan otonomi dan keamanan dalam lingkungan yang amanah. Selain itu, verifikasi

blok berbasis konsensus juga dipandang sebagai properti otonom dari solusi berbasis *blockchain*.

5. Keaslian

Semua entitas dalam solusi yang diusulkan diautentikasi sebelum melakukan transaksi. Proses autentikasi memastikan bahwa fungsi tertentu dijalankan oleh entitas yang berwenang dari sistem saja. Akibatnya, itu juga memastikan ketahanan terhadap serangan pihak perantara.

Secara keseluruhan, dengan menggunakan *blockchain*, industri rantai pasok telah memperoleh banyak manfaat untuk tumbuh dan bergerak menuju desentralisasi dan mencapai lingkungan yang menakutkan untuk semua proses. Namun, terlepas dari sifat *blockchain* yang tidak memerlukan kepercayaan, sulit untuk sepenuhnya mempertahankan kepercayaan antara penjual dan pembeli produk. Hal ini karena entitas dapat bertindak jahat dan pembeli dapat meragukan kredibilitas mereka. Selain itu, rantai pasok melibatkan banyak proses dan sub-proses yang perlu dilakukan secara terdesentralisasi untuk mencapai ketertelusuran, akuntabilitas, dan keamanan. Dalam bagian ini solusi ujung ke ujung untuk rantai pasokan *agri-food* berbasis *blockchain* telah direkomendasikan. Informasi rinci tentang solusi yang diusulkan dalam hal keterlacakan, perdagangan, pengiriman dan reputasi juga telah disampaikan. Shahid dkk. (2020) telah mengevaluasi dan menganalisis dengan cermat kinerja kontrak pintar untuk memastikan bahwa solusi yang diusulkan efisien dan kuat. Sistem reputasi diusulkan untuk menjaga kredibilitas entitas rantai pasok *agri-food* dan peringkat kualitas produk. Selain itu, ia juga mempertahankan kekekalan dan integritas transaksi karena transaksi ini didasarkan pada *blockchain*.

Sampai saat ini, sistem berbasis *blockchain* masih menghadapi tantangan terkait implementasi praktisnya. Di masa depan, kita bisa mengintegrasikan mekanisme pengembalian dana dan pengembalian dalam perdagangan produk Agri-Food. Demikian pula, sistem reputasi menyimpan ulasan dari konsumen akhir yang dapat bias atau

palsu. Dalam hal ini, kita punya kesempatan untuk mengintegrasikan sistem pendeteksi ulasan palsu yang akan memudahkan sistem reputasi dalam mendeteksi ulasan palsu dari konsumen akhir. Selain itu, analisis keamanan yang akan fokus pada serangan terhadap sistem reputasi juga bisa dipertimbangkan.

E. *Blockchain* Berkelanjutan untuk Rantai Pasokan Pangan Halal

Blockchain dikatakan sebagai obat mujarab dari masalah saat ini di berbagai industri dan rantai pasok. Rantai pasok mendapat manfaat dari adopsi *blockchain* karena meningkatkan transparansi, keterlacakan, kinerja perusahaan, dan model bisnis. Industri pangan telah mengamati potensi besar teknologi *blockchain* dan menganggap adopsi sebagai prioritas utama. Mempertimbangkan keuntungan dari *blockchain*, rantai pasok pangan dan industri telah memutuskan untuk mengadopsinya untuk berbagai tujuan, seperti keamanan pangan, transparansi, kualitas, dan keterlacakan. Meskipun rantai pasok pangan global mengintensifkan kebutuhan adopsi dan implementasi *blockchain*, Rogerson dan Parry (2020) secara sistematis meninjau studi tentang *blockchain* rantai pasok pangan dan menemukan bahwa studi tentang implementasi dan tantangan *blockchain* masih langka.

Teknologi disruptif telah diterapkan di rantai pasok pangan untuk mengatasi masalah industri. Atas dasar ini, memperkenalkan teknologi baru seperti *blockchain* ke dalam industri adalah pilihan yang layak. Meskipun demikian, teknologi *blockchain* masih memiliki masalah dan tantangan yang belum terselesaikan di luar teknis yang memerlukan lebih banyak eksplorasi dan investigasi. Sifat *blockchain* yang tidak dapat diubah dapat meningkatkan kinerja rantai pasok dan memperumit tindakan penipuan dalam rantai pasok pangan halal, yang melibatkan nilai tidak berwujud yang tidak dapat dievaluasi secara fisik, seperti penyembelihan, kontaminasi, dan kemurnian produk. Pangan halal mewakili lebih dari 17% dari total produksi pangan dunia. Tan dkk. (2020) menyoroti bahwa studi empiris tentang penerapan teknologi *blockchain* dalam konteks rantai pasok pangan

halal tersedia. Meskipun beberapa penelitian ada dalam wacana ini, sebagian besar literatur tentang rantai pasok pangan halal belum bersifat teoretis; misalnya, mengenai pemahaman konseptual, penerapan, dan peluang, tidak ada kerangka teoretis yang dikembangkan dari skenario kasus nyata. Tidak adanya penelitian empiris yang menghubungkan rantai pasok pangan halal dan *blockchain* juga menjadi batasan, oleh karena itu, menuai manfaat dari *blockchain* tetap sulit dan kompleks bagi pemain di rantai pasok dan pembuat kebijakan.

Generalisasi adopsi *blockchain* ke dalam rantai pasok pangan menjadi tantangan ketika ukuran perusahaan, eksportir, dan lingkungan bisnis bervariasi. Meskipun pemain kecil di rantai pasok dapat mengambil manfaat dari berinvestasi dalam adopsi *blockchain*, sebagian besar studi tentang adopsi *blockchain* telah meneliti konteks perusahaan yang lebih besar. Khusus untuk industri pangan halal, segudang standar, peraturan, dan persyaratan meningkatkan teknis adopsi *blockchain*. Dengan demikian, perluasan baru untuk peluang dan tantangan yang dihadapi oleh UKM, rantai pasok pangan halal dan pendukung utama mereka diperlukan untuk memahami perdebatan tentang adopsi dan implementasi *blockchain*.

Industri 4.0 merupakan era baru TIK di mana informasi tentang produk dihubungkan dengan aplikasi berbasis web dan diintegrasikan ke dalam proses produksi. Teknologi yang memberikan solusi yang lebih baik dan memiliki kemampuan untuk menggantikan metode tradisional di rantai pasok dapat dianggap disruptif. Keterkaitan dan kompleksitas atribut pangan di rantai pasok—yaitu ketertelusuran pangan, integritas pangan, keamanan pangan, pengiriman pangan, kualitas pangan, keamanan pangan, dan penarikan kembali pangan—memperburuk pengembangan dan penerapan teknologi yang berpotensi untuk membahas semua konsep pangan.

Meskipun segudang teknologi disruptif telah diperkenalkan di rantai pasok pangan, teknologi ini bertujuan untuk mengatasi masalah pangan tertentu dan bekerja dengan mandiri dengan beberapa efek limpahan pada atribut pangan yang berdekatan, misalnya kemasan pintar yang dapat digunakan sebagai alat pelacak atau mekanisme

anti-pemalsuan digunakan sebagai sistem yang berdiri sendiri. Selain itu, teknologi disruptif yang terdaftar dikembangkan untuk komunikasi satu arah; konsumsi pengguna dengan interaksi terbatas antar aktor di rantai pasok. Kekurangan dari hubungan dan komunikasi non-timbal balik membatasi antarmuka antara para aktor dalam rantai pasok pangan. Karena pangan adalah produk tipe fusi, produksi tidak dapat dimodulasi secara fisik setelah diproses. Oleh karena itu, teknologi disruptif yang memungkinkan pengembangan bersama di antara pemangku kepentingan rantai pasok pangan, serta penggabungan teknologi lain yang ada adalah hal baru. Teknologi *blockchain* memiliki kemampuan untuk mengatasi penggabungan teknologi yang ada dan membuka cakrawala untuk lebih banyak kolaborasi rantai pasok di platformnya.

Penerapan *blockchain* dalam proses produksi adalah untuk memberikan layanan yang lebih baik kepada konsumen menjadi bagian penting dari Industri 4.0. Secara teknis, Industri 4.0 mengacu pada jaringan global dinamis yang saling terhubung. Dalam lingkup yang lebih luas, digunakan untuk menghubungkan orang, barang, dan operasi melalui jaringan global dan untuk meningkatkan daya saing global serta menyediakan konektivitas jaringan di rantai pasok. Ada bukti yang menunjukkan bahwa Industri 4.0 telah mendorong penggunaan aplikasi teknologi *blockchain* dalam manajemen rantai pasok (Qian dkk., 2020; Zhao dkk., 2019). Aplikasi *blockchain* dalam manajemen rantai pasok diperkirakan mencapai nilai US\$ 3.3 miliar pada tahun 2023, dengan tingkat peningkatan tahunan sebesar 87% (Chang dkk., 2020). Belajar dari peluang dan potensi aplikasi *blockchain* di pertanian pangan dan rantai pasok pangan, industri dan pemangku kepentingannya bertujuan untuk memanfaatkan teknologi, misalnya, dengan meningkatkan transparansi di rantai pasok, yang rentan terhadap tindakan curang dari aktor yang tidak dipercaya. Dengan demikian, Kittipanya-ngam dan Tan (2020) mengembangkan kerangka kerja konseptual digitalisasi rantai pasok pangan, dan hubungan antara peluang dan tantangan utama pun dikemukakan. Namun, studi dan panduan terbatas tentang *blockchain* di negara

berkembang dan perusahaan dengan ukuran berbeda tidak dapat mengatasi dampak dinamis teknologi.

1. Rantai Pasok Pangan Halal Berbasis *Blockchain*

Rantai pasok tradisional menghadapi tantangan di setiap titik rantai, misalnya, keterlambatan pengiriman, tindakan curang, seperti pencurian dan pembusukan, kesalahan penanganan, kontaminasi, dan masalah yang tidak mudah ditangkap menggunakan pemeriksaan visual. Mengenai rantai pasok pangan halal, isu-isu seperti kontaminasi silang, pemalsuan status halal, penipuan, masalah logistik dan tidak ada pengembangan menuju standar halal yang berlaku di seluruh dunia selalu menjadi perdebatan publik. Industri halal menghadapi masalah ketidakakuratan dan ketidakadilan, mengingat kontrol atas keseluruhan sistem cukup sulit dicapai karena tidak semua orang memiliki akses ke informasi, yang dapat sangat mengurangi integritas rantai pasok pangan. Semua pemangku kepentingan dan pelaku industri memiliki buku besar internal untuk menyimpan informasi, sebuah sistem yang tidak benar-benar menganut transparansi.

Blockchain diharapkan mampu memastikan transparansi, informasi *real-time* pada produk apa pun, pengelakan penipuan, resistensi manipulasi, pengurangan biaya operasional, kemampuan audit, peningkatan kualitas produk, konsumsi yang aman dan sehat, serta proses sertifikasi halal yang lebih terstruktur. Biasanya, pangan halal disertifikasi oleh sertifikasi halal di negara asal oleh otoritas halal, dengan beberapa data yang relevan telah dimasukkan ke dalam blok *blockchain*. Data ini diperbarui saat item pangan bergerak di sepanjang rantai pasok, misalnya, ke lokasi penyimpanan, gudang, atau ke pihak perantara. Prosedur ini diulangi sampai barang mencapai tujuannya, pada saat itu diverifikasi oleh aplikasi *blockchain* sebelum otoritas halal menyetujui penerimaannya. Proses ini ditangkap dalam aplikasi *blockchain*, dan konsumen dapat memverifikasi semua informasi yang terkait dengan produk kapan saja.

Biasanya, transparansi adalah kunci sukses rantai pangan halal karena kehadiran transparansi meningkatkan keaslian dan kepercayaan terkait produk bersertifikat halal. Dengan demikian, *blockchain* sendiri adalah teknologi yang memungkinkan *database* bersama dilengkapi dengan sistem yang terbuka, aman, dan dapat diverifikasi yang tidak memerlukan kehadiran operator pusat; oleh karena itu, arus informasi tidak dapat dengan mudah dimanipulasi. Penerapan *blockchain* memungkinkan pemain rantai pasok multilevel untuk berkomunikasi secara efektif dan efisien untuk pengambilan keputusan yang lebih baik serta diyakini sebagai alat bisnis yang efektif untuk meningkatkan kinerja rantai pasok halal dan meningkatkan kualitas produk halal. Dengan kata lain, memanfaatkan teknologi *blockchain* dalam industri pangan halal memiliki potensi untuk merestrukturisasi cara konvensional dalam mengelola ketertelusuran pangan halal, mempromosikan kredibilitas dan kepercayaan, sambil meningkatkan ekonomi Islam secara luas.

Karena industri halal menangani kebutuhan dan persyaratan agama, *blockchain* dapat memastikan keterlacakan barang dari asalnya ke tujuan, meminimalkan kepercayaan yang diinvestasikan pada pihak ketiga di rantai pasok halal untuk kelayakan produk dan autentikasi integritas, sehingga menetapkan pentingnya teknologi ini bagi pasar pangan halal. Penggabungan *blockchain* dalam rantai pasok pangan halal dapat berfungsi sebagai platform untuk hubungan nyata antara mitra dagang yang didistribusikan secara global melalui basis jaringan yang transparan, komponen penting dari proses penyaringan Syariah untuk memastikan bahwa produk yang ditawarkan benar-benar halal. Misalnya, setiap aktivitas penting dalam rantai pasok pangan halal yang diidentifikasi dalam Tan dkk. (2017) dapat direkam dan informasi dapat ditransaksikan antar pemain dalam rantai pasok. Untuk pangan halal, elemen penting tersebut saat ini diwakili oleh logo halal. Dalam praktik saat ini, teknologi *blockchain* digunakan untuk melakukan beberapa transaksi dan fungsi, seperti aktivitas pengindraan, gerakan, dan suhu; menggerakkan dan mengumpulkan; dan memproses, menyimpan, dan berbagi data. Misalnya,

dalam logistik halal, kemasan halal dilengkapi dengan sensor yang menyampaikan informasi seperti suhu, kelembapan, tingkat cahaya, dan pergerakan, yang memungkinkan pemantauan dan pelacakan kondisi fisik seluruh pengiriman. Semua informasi ini diproses dan teknologi *blockchain* dapat mengatasi informasi tidak berwujud yang berada dalam rantai pasok halal. Perangkat sekarang bahkan dapat dikustomisasi dan dengan memiliki data instan mengenai kondisi fisik pengiriman memungkinkan visibilitas rantai pasok secara *real-time*, dan penggabungan elemen kemurnian rantai pasok pangan halal sama pentingnya dengan nilai tambah.

2. Peluang *Blockchain* dalam Rantai Pasok Pangan Halal

Secara teoretis, pihak-pihak yang berpartisipasi dalam *blockchain* dapat memperoleh manfaat dari berbagi informasi, yang saat ini dipraktikkan di industri pangan halal dengan menggunakan sertifikat halal. Dengan kata lain, *blockchain* dapat dengan mudah dicapai melalui digitalisasi sertifikat halal, yang dapat menjamin konsumen akan integritas halal. *Blockchain* dapat memenuhi tujuan utama manajemen rantai pasok, misalnya, fleksibilitas, kualitas, dan fleksibilitas mitigasi risiko (Kshetri, 2018) dan, dengan demikian, dapat menguntungkan rantai pasok pangan halal. Secara khusus, tujuan industri halal adalah untuk menjamin integritas rantai pasok, yang berkaitan dengan isu-isu di luar yang terkait dengan keamanan dan kualitas pangan yang biasanya diperiksa di rantai pasok pangan konvensional. Oleh karena itu, penelitian halal terkait dengan penipuan pangan, keterlacakan, dan transparansi umumnya diselidiki ketika mempertimbangkan teknologi *blockchain* (misalnya oleh Hew dkk., 2020; Rejeb dkk., 2020).

Teknologi *blockchain* masih baru dan proses adopsi serta menikmati manfaatnya tidak mudah dicapai terutama untuk UKM. *Blockchain* dapat dengan mudah diterapkan dengan memanfaatkan kematangan sertifikasi halal dan keseragaman data. Namun, penerapan pendekatan ini secara hati-hati diperlukan karena beberapa

alasan. Terdapat pemain di rantai pasok yang dianggap tidak kritis dan mampu berdagang di industri halal tanpa sertifikasi. Oleh karena itu, perusahaan yang tidak bersertifikat mungkin menjadi mata rantai yang hilang dalam mengintegrasikan sepenuhnya teknologi *blockchain* ke dalam rantai pasok halal jika langkah ini dipatuhi. Dalam kasus lain, verifikasi sertifikasi halal saat ini dilakukan melalui pemeriksaan disparitas manual antara sertifikat halal dan deskripsi label lokal, yang rentan terhadap gangguan. Praktis, tujuan akhir dari industri pangan halal tidak tercapai. Implementasi dan adopsi teknologi *blockchain* yang berhasil akan meningkatkan visibilitas, transparansi, dan keterlacakan. Namun, ketika ada tautan yang hilang di rantai pasok (misalnya, perusahaan yang tidak bersertifikat), yang selanjutnya akan memengaruhi sistem *blockchain*, pencapaian ketertelusuran, transparansi, dan integritas pangan halal akan menjadi lebih rumit. Selain itu, ketergantungan yang berlebihan pada sertifikasi halal dalam melakukan penyatuan informasi dan memasukkan informasi ke rantai menghasilkan sedikit insentif untuk sepenuhnya mengadopsi teknologi *blockchain* di industri.

F. Kerangka Kerja *Blockchain* untuk UKM Pangan Halal

Adopsi dan implementasi teknologi *blockchain* di rantai pasok pangan berada dalam fase embrionik dan mengalami banyak kendala. Selain itu, melalui konsolidasi literatur dan studi kasus, Ali dkk. (2021) mendalilkan lima dimensi berbeda dari tantangan yang dihadapi oleh UKM pangan halal dalam membuat *blockchain* yang layak, yaitu sebagai berikut: kompleksitas dan kemampuan, biaya dan keunggulan kompetitif, manajemen perubahan dan tekanan eksternal, produksi dan konsumsi halal berkelanjutan, serta kesalahan regulasi. Lima dimensi mencerminkan tantangan yang berada di dalam dan di luar kendali perusahaan, yang penting bagi UKM di rantai pasok pangan halal untuk dipertimbangkan sebelum merangkul dan mengadopsi *blockchain*.

1. Kompleksitas dan Kemampuan

Kompleksitas teknologi selalu menjadi topik penting dalam pembahasan adopsi inovasi. Literatur mengungkapkan bahwa perusahaan lebih memilih inovasi yang sederhana, *user-friendly*, berguna, dan mampu memberikan keuntungan. UKM mengalami kesulitan dalam mengadopsi teknologi *blockchain* (Wong dkk., 2020). Pengetahuan tentang TI dan peralatan sangat penting ketika mengadopsi teknologi *blockchain*, yang tidak umum di kalangan UKM di industri pangan halal. Selain itu, perangkat digital harus tersedia untuk semua aktor rantai pasok yang terlibat untuk *entri* data ke dalam rantai jaringan. Namun, untuk UKM, praktik ini tidak umum karena data masih direkam menggunakan pena dan kertas. Sebagai contoh, semua stok yang masuk diperiksa secara manual. Praktik umum lainnya adalah ketergantungan perusahaan pada pelabelan dan sertifikasi halal suatu produk. Selain itu, bahan yang digunakan untuk produksi standar dengan sedikit variabilitas. Oleh karena itu, mengganti kertas dan pena tradisional dengan perangkat digital bisa jadi mahal. Sistem pemantauan dan kontrol buatan sendiri bisa digunakan sehingga bisa menjadi penyebab transfer informasi ke *blockchain* menjadi masalah serius. Akibatnya, kesiapan UKM pangan halal mengenai adopsi lengkap dan implementasi teknologi *blockchain* di rantai pasok pangan dipertanyakan.

Rantai pasok pangan halal terdiri dari perusahaan dengan berbagai ukuran. Tanpa standar informasi yang seragam, perusahaan-perusahaan ini tidak dapat berbagi data yang akan mengakibatkan kesenjangan informasi, dan kompatibilitas teknis antar-perusahaan di rantai pasok hampir tidak mungkin tercapai. Dalam banyak kasus, tidak ada format informasi standar yang dibagikan dengan pemasok, kecuali untuk informasi yang tersedia mengenai sertifikasi halal. Negosiasi dengan para aktor di rantai pasok untuk menyatukan format data dapat dilakukan sebagai solusi. Namun, skala ekonomi UKM terlalu terbatas sehingga memengaruhi negosiasi. Keterbatasan ini secara signifikan menghambat kemampuan perusahaan untuk mengadopsi strategi *blockchain*. Pelepasan kegiatan rantai pasok yang

sulit dan mahal oleh perusahaan adalah strategi yang baik. Adopsi *blockchain* yang kompleks dapat ditangani melalui penunjukan penyedia layanan berbasis *blockchain*. Dalam konteks pangan halal, banyak penyedia layanan *blockchain* yang muncul, seperti Halal Digital Chain di Malaysia dan HalalChain di Uni Emirat Arab (Hew dkk., 2020). Namun, risiko masalah nonetis yang akan segera terjadi, seperti kepemilikan data yang tidak jelas dan kebocoran informasi, bisa muncul ketika dibagikan dengan pihak ketiga yang dilibatkan di *blockchain*. Akibatnya, kemampuan UKM pangan halal untuk mengontrol adopsi *blockchain* mereka terbatas.

2. Biaya dan Keunggulan Kompetitif

Sementara itu, pangan halal diproduksi untuk memenuhi pasar pangan muslim yang berkembang. Satu risiko penting adalah bahwa pangan tersebut mungkin diproduksi secara curang. Islam adalah salah satu agama dengan pertumbuhan tercepat, dan permintaan yang lebih tinggi untuk pangan halal terus berusaha dipenuhi. Selain itu, pangan halal juga dikonsumsi oleh agama lain; Peningkatan jumlah konsumen ini juga akan berdampak pada produksi pangan halal. Sebaliknya, produksi pangan masih mengejar permintaan, tantangan yang tidak bisa dikecualikan dari pangan halal. Selain itu, kegunaan teknologi *blockchain* di kalangan UKM di industri pangan halal telah menghasilkan temuan yang beragam. Meskipun peluang yang menjanjikan telah disebutkan, luasnya penerapan *blockchain* masih terbatas.

Untuk UKM, yang umumnya memiliki sumber daya yang terbatas, pengembalian investasi dalam adopsi teknologi sangat penting. Ketidakpastian seputar kembalinya investasi dalam teknologi *blockchain* menimbulkan lebih banyak keraguan tentang implementasi dan adopsinya. Misalnya, mengembangkan sistem keterlacakan halal berbasis *blockchain* membutuhkan investasi yang signifikan dalam multi-sumber daya yang mahal bagi perusahaan dan pada akhirnya menghentikan para pemangku kepentingan untuk berpartisipasi (Hew dkk., 2020). Sebaliknya, adopsi *blockchain* untuk keterlacakan

pangan memiliki margin keuntungan yang tipis, terutama untuk pedagang grosir dan restoran (Kim & Laskowski, 2018). Misalnya, dalam studi oleh Ali dkk. (2021) diajukan pertanyaan berikut: pangan halal membutuhkan keutuhan dalam rantai pasoknya. Dapatkah hal ini dipenuhi oleh *blockchain*? Bisakah *blockchain* menawarkan mekanisme kontrol yang lebih baik daripada yang sudah ada? Perusahaan menghabiskan lebih dari tujuh tahun membangun mekanisme kontrol mereka saat ini di rantai pasok mereka dengan menyelaraskan semua proses dan kegiatan yang sesuai dengan standar dan persyaratan halal yang ditetapkan oleh badan pengatur halal. Contoh lain dalam salah satu kasus yang merupakan anggota rantai restoran dan memproduksi produk pangan *Original Equipment Manufacturer* (OEM); mereka mengembangkan model bisnis sistem siklus tertutup yang membutuhkan lebih dari lima belas tahun untuk menyelesaikannya. Semua persediaan bahan diproduksi baik oleh dapur pusat atau oleh pabrik OEM, dan distribusi dilakukan di rumah. Langkah-langkah kontrol yang memastikan bahwa persyaratan halal dipenuhi dengan pemilihan pemasok yang ketat telah menjadi senjata kompetitif bagi perusahaan. Oleh karena itu, keunggulan kompetitif yang diberikan oleh *blockchain* memerlukan penetapan efektivitas biaya dan pengembalian investasi yang lebih tinggi bagi perusahaan.

Industri pangan halal bergantung pada sertifikasi halal, yang telah diuji untuk penerapan *blockchain*. Aplikasi *blockchain* akan membutuhkan banyak waktu untuk diterapkan di industri pangan halal karena lebih dari 70% dari total pasar pangan halal terdiri dari UKM. Misalnya ada kasus bahan baku utama industri bersumber dari pemasok utama yang merupakan distributor, dan informasi tersebut diteruskan melalui sertifikat halal. Mereka menunjukkan bahwa karena ukuran pesanan yang kecil, kesepakatan dengan pemasok utama tidak dapat dicapai di mana integrasi data di luar sertifikasi halal tidak mungkin dilakukan dan menghambat kelangsungan hidup *blockchain*. Dalam kasus lain pemasok tidak ingin membagikan data apa pun selain yang diatur dalam sertifikat halal. Berbagi data secara terbatas dapat menyebabkan hilangnya informasi; oleh karena itu,

proposisi nilai aplikasi *blockchain* dalam konteks pangan halal akan terbatas pada digitalisasi sertifikasi halal. Rantai pasok UKM biasanya lebih pendek, dan jumlah produknya kecil, membuatnya kurang kompleks dan mudah dikelola, sehingga menghalangi UKM untuk ikut menerapkan *blockchain*. Selain itu, keuntungan *blockchain* dari menghilangkan perantara tidak begitu menarik bagi rantai pasok pangan halal UKM.

Digitalisasi telah meningkatkan transparansi rantai pasok. Secara konseptual, ketika semua pemain di rantai pasok memasang informasi pada rantai, anggota rantai dapat mengembangkan aliansi strategis dan memilih mitra bisnis mereka secara bebas. Dibandingkan dengan teknologi digital konvensional, teknologi *blockchain* memungkinkan semua aktor rantai pasok memiliki akses penuh ke transaksi. Menelusuri konsep ini kembali ke periode sebelum keberadaan *blockchain*, transparansi sebelumnya dicapai melalui integrasi rantai pasok. Integrasi rantai pasok menyatakan bahwa perusahaan dengan integrasi yang lebih luas dari anggota rantai pasoknya lebih baik dalam hal kinerjanya (Tan dkk. 2017). Sejalan dengan itu, segudang penelitian telah memberikan bukti empiris tentang dampak integrasi rantai pasok pada kinerja perusahaan. Namun, dari konteks rantai pasok pangan, temuan tentang integrasi rantai pasok menghasilkan hasil yang beragam dalam hal kinerja yang dicapai. Penjelasan dominan untuk hasil yang tidak konsisten ini adalah bahwa pemain di rantai pasok pangan UKM enggan berbagi informasi (Tan dkk., 2017). Keengganan ini karena sifat bisnis pangan UKM, yang memungkinkan replikasi informasi dengan mudah. Dalam beberapa kesempatan, perusahaan besar mencoba meniru produk mereka karena beberapa kebocoran informasi selama transaksi dapat diamati. Sejumlah besar sumber daya diperlukan untuk mengurangi masalah ini. Meskipun *blockchain* dapat membangun sumber informasi tepercaya untuk semua transaksi, membuat informasi digital tersedia bagi siapa saja dalam sistem dapat menyebabkan ketidaknyamanan bagi UKM di industri pangan halal. Selain itu terdapat kasus informasi pemasok salah ditangani, yang mengakibatkan terciptanya beberapa pesaing di pasar. Mengingat

kelangkaan jumlah pemasok kredibel dengan sertifikasi halal dalam industri ini, setiap perusahaan harus mengembangkan kembali produknya untuk mendapatkan pasar yang lebih hijau. Oleh karena itu, hingga teknologi *blockchain* menetapkan beberapa parameter untuk memastikan privasi dan keamanan informasi sensitif, rantai pasok pangan halal UKM akan tertinggal dalam adopsinya.

3. Perubahan Manajemen dan Tekanan Eksternal

Secara umum, kesadaran dan keterampilan yang terkait dengan *blockchain* masih terbatas di rantai pasok pangan. Namun, para profesional dan pakar *blockchain* yang dapat memberikan platform pelatihan untuk rantai pasok pangan masih langka dan sebenarnya masih mendapatkan pengetahuan baru oleh diri mereka sendiri. Meski rendah, terdapat kesadaran akan teknologi *blockchain*. Namun, pemahaman tentang teknologi *blockchain* di rantai pasok pangan masih pada level konseptual karena keterbatasan referensi dan panduan terkait implementasi *blockchain* dalam praktiknya. UKM umumnya menerapkan organisasi yang lebih datar dan memiliki proses pengambilan keputusan yang terpusat. Adopsi *blockchain* tergantung pada pengetahuan dan keterampilan manajemen tingkat atas. Keputusan mengenai dorongan teknologi dan otomatisasi dalam perusahaan adalah milik manajemen tingkat atas, biasanya pemilik perusahaan. UKM pangan halal umumnya melihat sertifikasi halal sebagai penentu pasar; karenanya, perubahan tambahan pada sistem yang ada, yaitu untuk mengakomodasi *blockchain*, dianggap tidak tepat waktu atau masih belum sesuai. Seperti dalam kasus rantai restoran dan produk pangan OEM terkena dampak kasus viral *online* yang menunjukkan produksi produk pangan yang mengandung babi, yang tidak diperbolehkan untuk dikonsumsi Muslim. Setelah penyelidikan yang cepat dan hati-hati oleh badan pengawas halal, kasus dibantah pada hari yang sama. Efisiensi mekanisme halal saat ini mungkin lebih besar daripada manfaat aplikasi *blockchain* dalam hal keterlacakan karena biaya teknologinya lebih tinggi daripada nilai

pangan itu sendiri. Investasi dalam sistem berbasis *blockchain*, yaitu, meningkatkan ketertelusuran dalam rantai pasok pangan, menimbulkan biaya yang meningkat tanpa harus meningkatkan pendapatan.

Adopsi dan implementasi teknologi *blockchain* mengharuskan perusahaan untuk memiliki pemahaman holistik tentang infrastruktur dan pengaturan terkait yang diperlukan untuk mendukung teknologi dalam setiap perusahaan. Kemungkinan besar, infrastruktur dan sistem pendukung perusahaan yang ada akan ketinggalan zaman dan dengan demikian tidak selaras dengan teknologi *blockchain*. Selain itu, model bisnis baru mungkin juga diperlukan, dan model bisnis serta operasi mungkin mengalami ketidakcocokan dengan teknologi *blockchain*. Adopsi *blockchain* oleh perusahaan mungkin memerlukan perombakan besar-besaran, yang akan berdampak pada manajemen perubahan. Tantangan terbesar dalam manajemen perubahan umumnya terkait dengan manajemen sumber daya manusia; perusahaan diharapkan untuk mendorong karyawan untuk menerima teknologi *blockchain*. Misalnya muncul kesulitan yang dihadapi dalam mengelola karyawan dan operasi selama upaya mencapai sertifikasi Analisis Bahaya dan Pengendalian Titik Kritis/*Hazard Analysis and Critical Control Point* (HACCP), dengan perubahan besar yang diperlukan dalam perusahaan. Apalagi industri pangan dibanjiri meta-sistem dan sertifikasi. Metasistem ini bersifat tumpang-tindih dan saling bertentangan, membawa lebih banyak tantangan untuk peraturan dan undang-undang terkait *blockchain* yang akan membutuhkan perubahan yang menakutkan di dalam perusahaan untuk membuat mereka siap mengadopsi teknologi (Galvez dkk., 2018).

4. Produksi Halal Berkelanjutan

Perusahaan sekarang lebih cenderung untuk menjadi berkelanjutan dan bertanggung jawab secara sosial. Produksi halal dianggap berkelanjutan karena proses spesifiknya (Tan dkk., 2017). Karena tujuan dari produksi halal adalah untuk menghasilkan produk yang aman, berkualitas tinggi, dan dengan integritas yang utuh bagi konsumen, memasukkan dinamisme konsep pangan ke dalam

implementasi aplikasi *blockchain* harus dipertimbangkan. Selain itu, tidak semua parameter pangan dapat dipantau menggunakan metode analitik (Kamilaris dkk., 2019). Beberapa konsep dan parameter pangan, seperti keamanan, kualitas, integritas, dan kemurnian, sangat sulit diukur dan ditetapkan secara analitis, karena mencakup dan melibatkan banyak aspek produksi di setiap eselon rantai pasok.

Zhao dkk. (2019) berpendapat bahwa teknologi *blockchain* bermanfaat dalam mengurangi risiko keamanan pangan, yang berkaitan dengan dampak sosial. Di sisi lain, Ali dkk. (2021) memberikan contoh penting yang membantah argumen ini. Ali dkk. (2021) menyiratkan bahwa informasi yang terbatas misalnya mengenai pestisida dan pupuk yang digunakan untuk menanam tanaman. Mereka lebih lanjut berpendapat bahwa petani tidak dapat memperbarui informasi mengenai jenis, jumlah, frekuensi, dan potensi pestisida dan pupuk yang digunakan selama periode budi daya yang biasanya panjang. Beberapa informasi yang tersedia biasanya diberikan sebagai informasi menyeluruh untuk keseluruhan proses, seperti sertifikat keberlanjutan. Bahkan jika input informasi yang tepat tersedia ketika teknologi *blockchain* diadopsi, prosesnya membosankan, melelahkan dan mahal bagi UKM pada rantai pasok pangan halal. Secara ekonomi, kekhawatiran yang sama mengenai keengganan karyawan yang mapan, berpengalaman, dan berpengetahuan luas untuk merangkul *blockchain* ke dalam praktik bisnis mereka juga muncul. Mereka menganggap bahwa operasi saat ini cukup berkelanjutan dan belum mengamati kisah sukses dari adopsi *blockchain* ke dalam bisnis. Demikian pula, memasukkan *blockchain* sebagai bagian dari upaya berkelanjutan menjadi membingungkan. Mereka lebih lanjut menyoroti bahwa anggota rantai pasok masih menghubungkan *blockchain* dengan transaksi dan komunikasi yang memiliki dampak minimal dalam mempertahankan perusahaan. Umumnya, UKM pangan halal, tidak seperti produsen pangan premium lainnya, tidak dapat mentransfer biaya ini ke pelanggan akhir dengan menetapkan harga yang lebih tinggi dan oleh karena itu memenuhi mekanisme yang ada yang dianggap sangat terkait dengan upaya berkelanjutan.

5. Kesalahan Regulasi

Blockchain pada akhirnya akan menguntungkan rantai pasok; namun, sangat tergantung pada badan pengatur yang menjalankan industri. Persyaratan hukum umum dan standarisasi teknologi *blockchain* belum disepakati dan ditetapkan (Keogh dkk., 2020), membutuhkan sejumlah besar penjaminan kebijakan oleh badan pengatur yang memainkan peran penting dalam industri pangan halal, seperti MUI dan Kementerian Kesehatan. Kebijakan dan regulasi *blockchain* diperlukan untuk menentukan kelayakan adopsi. Selanjutnya, standar halal internasional yang berbasis sukarela dan kurang dimanfaatkan memperumit kontrak cerdas antara dua pihak pada rantai pasok halal. Seperti yang disebutkan, pangan halal bergantung pada pemerintah/ lembaga sertifikasi yang memiliki interpretasi mereka sendiri tentang sumber-sumber ajaran Islam, yaitu Al-Qur'an dan ajaran Nabi Muhammad, yang mungkin sedikit berbeda satu sama lain.

Ketidakseragaman dan sertifikasi berbasis sukarela meninggalkan beberapa pemain yang tidak kritis di rantai pasok, yaitu petani sayuran, distributor, dan penyedia logistik, tanpa sertifikasi halal, yang selanjutnya dapat memperumit pembagian data di *blockchain*. Transisi ke adopsi yang lebih luas dari teknologi *blockchain* harus dipimpin dan diatur oleh otoritas industri yang lebih tinggi. Namun, upaya sedang dilakukan untuk mewujudkan dan melacak data fisik menggunakan *blockchain* melalui sistem HACCP, yang mungkin berlaku untuk industri pangan halal (Creydt & Fischer, 2019). Meski demikian, risiko terhadap produk pangan halal ada di semua tingkatan, yang berada di luar jangkauan titik kritis. Untuk konsep halal, kebijakan dan peraturan *blockchain* diupayakan untuk dikaitkan dengan obat mujarab saat ini bagi industri halal dan sertifikasi halal. Mengikuti logika ini, untuk memastikan keberhasilan implementasi *blockchain*, pemain yang tidak kritis juga harus disertifikasi, yang akan berdampak pada petani kecil yang berada di dalam rantai pasok UKM. Memperluas sertifikasi halal ke pemain yang tidak kritis akan memberlakukan persyaratan yang lebih ketat dalam rantai pasok halal yang ada dan selanjutnya menghambat penerapan mutlak teknologi *blockchain*. Un-

tuk UKM yang termasuk dalam poin tidak kritis, teknologi *blockchain* dapat dilihat sebagai sertifikasi sukarela lain yang tidak akan mereka terapkan ketika manfaatnya tidak jelas. Pelibatan penyedia logistik halal pihak ketiga itu menantang dan tidak memberikan nilai tambah pada produk jadi UKM. Lebih lanjut, penyedia logistik halal sebagian besar tidak tersedia dan digunakan secara sukarela, yang memperumit implementasi *blockchain* dari rantai pasok UKM halal yang lengkap.

G. Pengaktif Utama *Blockchain* Halal di Rantai Pasok UKM

Dalam beradaptasi dengan lingkungan yang berubah, perusahaan harus mampu mengintegrasikan, membangun, dan mengonfigurasi ulang kompetensi internal dan eksternal. Sejalan dengan itu, untuk mendapatkan kesuksesan dalam adopsi *blockchain* di UKM pangan halal, mengintegrasikan kompetensi internal dan eksternal sangat penting. Mengikuti operasionalisasi kemampuan dinamis (penginderaan, perebutan, dan transformasi), *blockchain* dianggap sebagai teknologi disruptif dengan potensi besar jika diadopsi dan diterapkan di rantai pasok pangan halal. Namun, adopsi dan implementasi teknologi *blockchain* di industri pangan halal, khususnya di UKM, masih rendah. Situasi membingungkan dari ketidakcocokan antara peluang dan adopsi *blockchain* telah diidentifikasi dalam bagian ini dan menunjukkan bahwa faktor internal dan eksternal diperlukan untuk mengurangi dampak dan merebut peluang *blockchain* di rantai pasok pangan halal UKM.

Pembinaan integrasi rantai pasok antar perusahaan menjadi sebuah kewajiban. *Blockchain* tetap menjadi teknologi yang bertujuan untuk menyederhanakan dan meningkatkan kolaborasi antara dua pihak di rantai pasok. Tanpa integrasi rantai pasok yang lebih luas, apa pun bentuknya, seberapa canggih, dan seberapa sederhana implementasi dan aplikasinya, potensi dan manfaat *blockchain* tidak akan pernah bisa dicapai. Komponen kepercayaan dalam industri halal harus melampaui sertifikasi halal. Sistem tertutup didirikan di dalam perusahaan yang berhasil mengatasi masalah halal di perusahaan dan

menganggapnya sebagai keunggulan kompetitif. Sistem ini dikembangkan dengan mitra rantai pasok strategis dengan berbagi data yang bahkan lebih sensitif daripada sertifikat halal. Mampu mengambil risiko melalui berbagi informasi dengan pemasok, misalnya, adalah tugas yang menakutkan, karena menuntut kepercayaan penuh antar pihak. Selain itu, karena *blockchain* tidak mengizinkan opsi “Ctrl+Z”, informasi tersebut tersedia secara permanen di rantai. Beberapa faktor yang tidak dapat dikendalikan juga ada, seperti permainan curang oleh beberapa pemain rantai pasok, dan aliansi strategis dan tepercaya tidak akan pernah dapat ditemukan jika perusahaan tidak secara bertahap menjadi lebih ramah dalam hal berbagi data dan terhubung secara digital. Oleh karena itu, kesiapan perusahaan UKM halal untuk integrasi *blockchain* sangat memengaruhi implementasi *blockchain* di rantai pasok secara keseluruhan.

Regulasi, standar halal, dan badan pengatur halal telah menjadi tulang punggung industri halal. Peraturan yang lebih ketat, standar halal yang direvisi, dan badan pengatur proaktif dalam industri halal dapat memainkan peran besar dalam adopsi *blockchain*. Dengan demikian, mengutamakan integritas halal dan meminta pemain non-kritis di rantai pasok untuk disertifikasi halal menjadi sangat penting. Blockchain tidak dapat bekerja pada tingkat optimal ketika tautan atau informasi yang hilang terjadi di rantai pasok. Industri atau produk halal menghargai keutuhan dan integritas; oleh karena itu, pendekatan formatif harus mematuhi implementasi dan adopsi *blockchain*. Dengan demikian, industri halal membutuhkan badan yang tidak hanya mengatur tetapi juga memperjuangkan setiap inovasi yang berkontribusi pada kemajuan industri. Selain itu, badan pengatur halal dapat memainkan peran penting dalam mengangkat masalah etika seputar persoalan yang menjadi perhatian perusahaan di mana kasus yang diteliti, sehingga memastikan privasi, keadilan, dan regulasi bagi UKM yang bersedia berkomitmen pada teknologi *blockchain*. Secara khusus, UKM di rantai pasok pangan halal menghadapi tantangan yang membatasi kemampuan untuk mengadopsi teknologi *blockchain* dan merupakan segmen terbesar dalam industri

pangan halal. Singkatnya, peran pemerintah dan peraturan penting dalam membantu UKM, terutama dalam hal adopsi teknologi seperti *blockchain*.

Singkatnya, *blockchain* sebagai teknologi disruptif dapat membantu UKM pangan halal mencapai transparansi rantai pasok pangan. Namun, beberapa tantangan dapat menghambat penerapannya. Investigasi *blockchain* dalam konteks rantai pasok halal yang didukung oleh bukti empiris sangat dibutuhkan.

Dampak *blockchain* pada rantai pasok UKM pangan halal didalilkan dalam kerangka kerja yang terdiri dari lima dimensi. Namun, semua dimensi itu sama pentingnya dalam konteks rantai pasok pangan halal. Menguatkan literatur yang menunjukkan bahwa rantai pasok pangan halal adalah konsep formatif, dimensi ini saling terkait. Dengan kata lain, ketiadaan satu dimensi akan menghancurkan makna mutlak halal. Namun, keterkaitan antara dimensi belum dieksplorasi dalam konteks *blockchain*. Selain itu, teknologi *blockchain* sangat terkait dengan penurunan kontemporer dalam ketertelusuran halal dari aspek pangan penting lainnya, seperti kualitas, keamanan, dan integritas pangan. Penelitian masa depan tentang *blockchain* yang mencakup lebih banyak aspek pangan di bawah satu studi akan menghasilkan pemahaman yang lebih mendalam tentang penerapan kerangka kerja. Selain itu, diperlukan panduan praktis yang terperinci untuk menjelaskan kerangka kerja, karena UKM tidak hanya terikat pada ketertelusuran mengingat rantai pasok mereka menjadi lebih pendek dan tidak terlalu kompleks.

Mengingat bagian ini terbatas untuk mengidentifikasi tantangan adopsi teknologi *blockchain* dan kemungkinan solusi berdasarkan perspektif kemampuan dinamis, ada banyak cara lain untuk memanfaatkan peluang dari teknologi *blockchain*. Penting untuk memastikan bahwa teknologi yang diadopsi oleh UKM halal tecermin dan selaras dengan kebutuhan saat ini dan masa depan. Oleh karena itu, gagasan keberlanjutan, seperti manajemen rantai pasok hijau, dianggap sebagai salah satu subjek pembahasan masa depan yang penting. Terdapat sorotan akan tantangan, praktik, perspektif, dan faktor pendukung yang

tumpang-tindih, yang merupakan celah penting dan memerlukan penyelidikan. Misalnya, penelitian masa depan dapat secara strategis mengidentifikasi prioritas dan peringkat tantangan/praktik teknologi *blockchain* yang dihadapi oleh rantai pasok pangan halal yang perlu ditangani, karenanya, memberikan wawasan penting hingga industri pangan, UKM, dan wacana rantai pasok yang kompleks.

Kompleksitas rantai pasok berbeda dari satu perusahaan/produk ke yang lain; dengan demikian, validasi generalisasi dan universalitas kerangka kerja harus dicoba dalam penelitian masa depan. Penelitian yang dilaksanakan oleh Ali dkk. (2021) bersifat eksploratif, dan penelitian lebih lanjut dengan lebih banyak kasus yang melibatkan perusahaan dengan ukuran yang sama/berbeda (perusahaan mikro dan perusahaan multi-nasional) atau lebih banyak jenis produk pangan dapat menghasilkan validasi teoretis. Pangan halal adalah fenomena diet global, dan industri serupa di bagian lain dunia mungkin berbeda secara signifikan dalam hal kesiapan teknologi dan lingkungan mereka untuk adopsi *blockchain*. Negara dan pengaturan industri yang berbeda dapat memberikan konteks yang berbeda untuk struktur industri dan tata kelola rantai pasok halal yang dapat memengaruhi implementasi dan adopsi *blockchain*.

Bab selanjutnya akan mulai membahas teknologi lain, yaitu *big data*. Namun, sebelum kita melangkah ke sana, kita bisa mencatat terlebih dahulu bahwa munculnya era *big data* di internet telah menyebabkan ledakan pertumbuhan ukuran data. Sementara itu, di sisi lain masalah kepercayaan telah menjadi masalah terbesar dari *big data*, yang menyebabkan kesulitan dalam sirkulasi data yang aman dan pengembangan industri. Teknologi *blockchain* hadir memberikan solusi baru untuk masalah ini dengan potensi proses non-gangguan, fitur yang dapat dilacak dengan kontrak pintar yang secara otomatis menjalankan instruksi default. *Blockchain* dan *big data* adalah salah satu teknologi baru yang menjadi agenda utama banyak perusahaan termasuk dalam industri pangan. Keduanya diharapkan secara radikal mengubah cara bisnis dan organisasi dijalankan di tahun-tahun mendatang. Lama berkembang secara terpisah, pada pandangan pertama

orang mungkin berasumsi bahwa teknologi ini saling eksklusif. Namun, pendapat ini berubah dengan cepat. Ada harapan yang berkembang bahwa buku besar (*ledgers*) yang didistribusikan akan membantu perusahaan mengatasi permasalahan *big data*. *Blockchain* dan *big data* ketika digabungkan dapat membawa banyak peluang. Beberapa bahkan mengatakan bahwa *blockchain* dan *big data* dibuat untuk satu sama lain.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB 6

***Big Data* dan Rantai Pasok Pangan**

A. Integrasi Informasi Pangan melalui *Big Data*

Memberi makan 9–10 miliar orang pada tahun 2050 dengan aman dan berkelanjutan adalah salah satu tantangan terbesar yang dihadapi umat manusia. Kinerja dalam rantai pasok pertanian pangan mungkin sulit diprediksi dan dioptimalkan karena beberapa karakteristik uniknya, yang dapat menyebabkan inefisiensi dan pemborosan yang besar. Sekitar 25% pangan yang diproduksi di Amerika Serikat hilang atau terbuang dalam rantai pasok sebelum sampai ke konsumen (Dou dkk., 2016). Rantai pasok pertanian pangan juga memakai banyak sumber daya berharga termasuk tanah, air, energi, dan sumber daya manusia, yang berarti kehilangan pangan dan limbah sama dengan menyia-nyiakan sumber daya ini pada saat mereka juga diperlukan untuk kebutuhan masyarakat lainnya seperti, kesehatan, sanitasi, dan transportasi. Produk pangan juga sensitif terhadap waktu dan mudah rusak. Mereka sering bersumber dari lokasi terpencil atau sulit dijang-

kau. Produksi mereka dipengaruhi oleh faktor lingkungan yang tidak terkendali dan tunduk pada tuntutan serta peraturan kualitas yang ketat. Produk pangan juga bersaing untuk terus mengubah preferensi konsumen. Keputusan yang berhubungan dengan faktor-faktor ini dan memengaruhi kualitas produk sangat luas. Hal ini dapat digeneralisasi termasuk pemilihan pemasok dan pengaturan parameter kontrol proses mereka di setiap langkah rantai pasok.

Bab ini membahas beberapa masalah tersebut di atas. Kappelman dan Sinha (2021) memodelkan rantai pasok pangan sebagai serangkaian langkah berurutan di mana keputusan yang dibuat memengaruhi kualitas produk akhir. Pendekatan ini menyarankan penggunaan metode pemrograman dinamis untuk memodelkan sistem optimalisasi. Banyak model deterministik telah dikembangkan di area ini, tetapi penulis menyadari bahwa ada banyak sumber ketidakpastian yang memengaruhi hasil termasuk suhu, kelembapan, kondisi penyimpanan, moda transportasi, teknologi, dan lain-lain yang memengaruhi produk akhir dan karenanya memengaruhi keputusan kontrol optimal dalam rantai pasok pangan. Untuk mengatasi ketidakpastian ini, penulis memodelkan rantai pasok pangan sebagai *Markov Decision Process* (MDP). Penulis juga mempertimbangkan bahwa pemilihan pemasok beserta parameter kontrol prosesnya dapat berdampak pada tingkat kualitas produk pada setiap langkah dalam rantai pasok.

Banyak karya memperdebatkan kompleksitas model dan kemudian menggunakan metode perkiraan untuk menganalisis kinerja sistem mereka. Sebaliknya, kontribusi utama dari bab ini adalah untuk permodelan rantai pasok pangan secara dinamis dan memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data. Keuntungan utama dari model keputusan berbasis data dalam rantai pasok adalah kemampuannya untuk memprediksi probabilitas hasil secara statistik berdasarkan keputusan input dan status informasi, yang membantu menangkap ketidakpastian yang diperkenalkan oleh berbagai sumber. Hal ini juga memungkinkan pengambil keputusan untuk memahami bagaimana hasil ini dapat berkontribusi pada kualitas produk di seluruh rantai pasok. Tujuan ini bisa dicapai dengan mengintegrasikan teknik *data*

mining dengan model MDP untuk menentukan pemasok yang optimal dan parameter kontrol proses mereka di setiap tingkat rantai pasok. Dengan mempertimbangkan produk yang berpotensi mudah rusak, penulis memaksimalkan kualitas produk akhir. Selanjutnya, secara numerik mengeksplorasi dampak biaya dan kendala kualitas pada keputusan yang optimal.

Masalah rantai pasok pangan dapat dikelompokkan dengan banyak metode seperti *planning horizon*, metode solusi dan pemodelan, dan *perishability* produk yang dipertimbangkan. Lingkup *planning horizon* dapat bervariasi dari strategis, taktis, hingga keputusan tingkat operasional. Metode solusi dan pemodelan dapat dibagi menjadi dua kategori besar, yaitu deterministik dan stokastik. Masing-masing dapat mencakup masalah yang dinamis atau statis. Beberapa juga membedakan daya tahan produk.

B. Masalah Pergudangan Produk Pertanian

Pertumbuhan populasi dunia, perubahan kebiasaan makan dan cuaca yang tidak menentu memengaruhi produksi pertanian saat ini dan masa depan (Sharma & Parhi, 2018). Bagaimana kita dapat meningkatkan produktivitas dan mencapai ketahanan pangan bagi 10 miliar orang pada tahun 2050 adalah perhatian utama. Ada empat faktor penting ketika kita berbicara tentang ketahanan pangan, yaitu ketersediaan pangan, aksesibilitas pangan, keterjangkauan pangan, dan stabilitas pangan. Keempat faktor ini akan dibahas sebagai berikut.

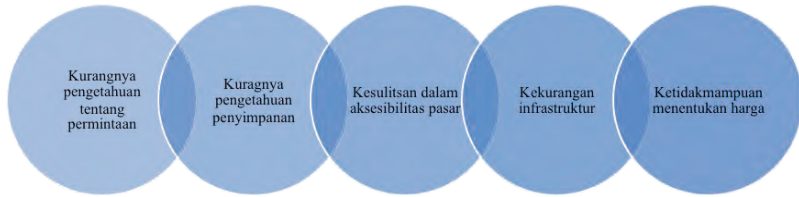
1. Ketersediaan Pangan

- a. Negara harus mampu memproduksi (atau mengimpor) pangan yang dibutuhkan oleh warganya.
- b. Harus ada stok pangan yang cukup yang disimpan di gudang/lumbung pemerintah, jika terjadi keadaan darurat.
- c. Situasi tidak tersedianya pangan seharusnya tidak muncul karena keadaan apa pun—pemerintah harus siap untuk segala kemungkinan.

2. Aksesibilitas Pangan
 - a. Pangan yang tersedia oleh pemerintah harus mudah diakses oleh semua warganya.
3. Keterjangkauan/Pemanfaatan Pangan
 - a. Pangan yang tersedia harus terjangkau oleh masyarakat termiskin.
 - b. Istilah “pemanfaatan” di sini mengacu pada penggunaan pangan untuk nutrisi tubuh dan kegunaan yang diperoleh dari pangan.
4. Stabilitas pangan
 - a. Selama periode tertentu, orang dapat mengakses dan memanfaatkan pangan.
 - b. Pangan tetap stabil dan berkelanjutan dari waktu ke waktu.

Saat ini, dengan kemajuan teknologi, semua informasi yang diperlukan berkaitan dengan cuaca, tren terbaru dalam pertanian dan wawasan berharga lainnya sudah tersedia bagi para petani. Difusi teknologi, terutama telepon seluler, telah membawa dampak yang jauh lebih besar dalam menyadarkan para petani. Data adalah yang paling penting. Data menjadi alat penting dalam pemberdayaan petani. Wawasan lokal dan tepat waktu membantu menginformasikan petani dalam pengambilan keputusan. Penyebaran dan penjangkauan informasi multi-arah di seluruh rantai nilai pertanian dipastikan dengan metode dan praktik *big data*. Informasi ini tersebar di seluruh penyedia input. Bagian ini akan menganalisis kekosongan dalam aksesibilitas data yang memberikan kemanjuran pasokan pangan yang memadai.

Sebagian besar petani memiliki lahan kecil. Dan, para petani mengelola lahan dengan cara mereka sendiri. Petani kurang memiliki pengetahuan tentang permintaan dan penawaran. Oleh karena itu, kondisi ini menempatkan petani dalam situasi ketidaktahuan tentang berapa banyak yang akan ditanam, berapa banyak yang harus dijual dan berapa banyak yang harus disimpan. Gambar 6.1 menyoroti



Sumber: Sharma dan Parhi (2018)

Gambar 6.1 Penyebab Penderitaan Para Petani

masalah yang dihadapi oleh para petani karena kurangnya aksesibilitas data.

1. Kurangnya pengetahuan tentang permintaan: Ketika petani pedesaan tidak memiliki akses ke pengetahuan dan informasi yang akan membantu mereka mencapai hasil pertanian yang maksimal, mereka tidak hanya meraba-raba dalam kegelapan tetapi juga didorong ke pusat kota untuk mencari pekerjaan formal, sebagai satu-satunya pilihan untuk bertahan hidup. Kurangnya akses ke pengetahuan dan informasi pertanian dasar oleh petani pedesaan mungkin merupakan akibat dari kendala tertentu dan ini telah membuat petani tetap berpegang pada metode pertanian dan praktik peternakan tradisional mereka, sehingga mengakibatkan produktivitas tanaman dan ternak yang buruk. Informasi dan pengetahuan sangat penting dalam pembangunan pertanian di setiap komunitas dan di mana informasi serta pengetahuan tersebut kurang disebarluaskan karena kendala-kendala tertentu, pembangunan pertanian masyarakat menjadi sangat terhambat.
2. Kurangnya pengetahuan penyimpanan: dengan kurangnya pengetahuan tentang permintaan, muncul kurangnya pengetahuan tentang produk yang akhirnya mengarah pada kurangnya pengetahuan penyimpanan. Para petani tidak dalam posisi untuk memperkirakan permintaan dan produksi tanaman mereka. Hal ini menimbulkan ancaman yang sangat berbahaya bagi tanaman karena bisa menyebabkan kerugian transit dan penyimpanan

yang berdampak pada terbuangnya hasil panen. Pemborosan pangan ini merupakan peluang yang terlewatkan untuk meningkatkan ketahanan pangan global di dunia di mana satu dari delapan orang mengalami kelaparan, yang mengkhawatirkan, pada tahun 2020 kelaparan melonjak baik secara absolut maupun proporsional, melampaui pertumbuhan populasi; sekitar 9,9% dari semua orang diperkirakan mengalami kekurangan gizi, naik dari 8,4% pada tahun 2019 (WHO, 2021).

3. Kurangnya aksesibilitas/integrasi pasar: meskipun mendapatkan produk yang baik, jika petani tidak dapat menjual produk di pasar, seorang petani kehilangan sebagian besar pendapatannya. Hal ini menjadikan petani peserta pasif. Para petani dibatasi oleh kurangnya informasi tentang pasar, kurangnya pengalaman bisnis dan negosiasi, dan kurangnya organisasi kolektif di mana mereka dapat mencocokkan persyaratan dengan perantara pasar yang lebih kuat. Kendala dalam integrasi/aksesibilitas pasar yang efektif muncul karena sebab berikut.
 - a. Kendala yang menghambat produksi dan konsistensi pasokan: petani sering kali tidak dapat menghasilkan jumlah yang cukup untuk memenuhi permintaan pasar sepenuhnya, yang menyebabkan hilangnya pendapatan dan hilangnya daya saing.
 - b. Kendala yang meningkatkan biaya pasar: lokasi yang jauh dari pasar menyebabkan penurunan kualitas barang sehingga menurunkan harga bagi petani.
 - c. Kendala yang mengurangi aksesibilitas pasar: kurangnya pengetahuan tentang langkah-langkah sanitasi dan fitosanitasi (untuk mengekspor produk) sehingga petani cenderung kehilangan daya saing harga.
 - d. Kendala yang memutus hubungan pasar: ada kurangnya kepercayaan yang berkembang antara petani 'lemah' dan perantara pasar yang kuat.
4. Kurangnya fasilitas infrastruktur: industri pergudangan sangat terfragmentasi dan tidak terorganisasi. Sektor pergudangan melayani kebutuhan berbagai sektor seperti manufaktur, ritel,

logistik dan pertanian. Gudang pertanian digunakan untuk menyimpan komoditas pertanian pascapanen. Penyimpanan komoditas penting karena produksi komoditas ini bersifat musiman dan ada jeda waktu untuk dikonsumsi. Oleh karena itu, sangat penting untuk menjaga dan melestarikan komoditas ini untuk memastikan pasokan yang berkelanjutan sepanjang tahun dan untuk mengurangi fluktuasi harga. Gudang berusaha untuk menyimpan komoditas, melestarikannya dan menjaganya tetap aman sampai saat pengiriman. Namun, pelanggan gudang tidak mengetahui apakah gudang akan memenuhi kewajibannya secara penuh atau tidak. Juga, pemberi dana tidak percaya diri dalam menyediakan pendanaan komoditas tanpa adanya informasi tentang penyimpanan dan pemeliharaan komoditas yang didanai. Saat ini terjadi asimetri informasi di industri karena tidak ada informasi yang dapat membedakan antara kualitas infrastruktur dan layanan yang ditawarkan oleh penyedia layanan/organisasi pergudangan dengan yang lain.

5. Ketidakmampuan menentukan harga: karena kurangnya penyebaran informasi yang berkaitan dengan harga pasar, para petani menderita di bagian ini dan terpaksa menjual produk dengan harga lebih rendah. Oleh karena itu, petani tidak dapat mewujudkan potensi penuh dari sumber daya yang digunakan sebagai input. Harga Eceran Tertinggi biasa ditetapkan oleh pemerintah, tetapi jika terjadi peristiwa berisiko tinggi yang menimbulkan bencana, seperti jatuhnya harga, petani menjadi pihak yang paling terpukul.

Data adalah bagian yang berkembang dari kehidupan kita. Dunia kita dibanjiri dengan data. Data memiliki potensi besar untuk meningkatkan taraf hidup petani. Saat ini, semakin banyak data yang diproduksi dan penggunaannya semakin meluas. Kemampuan untuk mengakses, menganalisis, dan mengelola volume data yang sangat besar sangat penting untuk keberhasilan operasi dari keprihatinan agrobisnis dan petani. Data membantu dengan cara meningkatkan teknik dan hasil produksi serta meningkatkan perkiraan untuk meng-

optimalkan rantai pasok dengan lebih baik. Informasi membantu memperoleh wawasan baru untuk mengetahui pangsa pasar yang berkembang dari produk di seluruh pasar. Seiring dengan kemajuan dan keragaman agrobisnis, volume data yang harus dikelola juga menjadi kompleks. Data eksternal dari media sosial dan saluran jaringan pemasok yang dikombinasikan dengan sensor dan data mesin yang berasal dari peralatan pertanian dan di ladang pertanian menambah sumber data tradisional. Sumber data ini dapat mencakup:

- a. Data perusahaan dari sistem operasional
- b. Data sensor lahan pertanian (misalnya suhu, kelembapan, curah hujan, sinar matahari)
- c. Data sensor peralatan pertanian (dari traktor, bajak, dan pemanen)
- d. Barang yang dipanen dan kendaraan pengiriman ternak (dari peternakan ke fasilitas pemrosesan)
- e. Data perdagangan komoditas
- f. Data perkiraan keuangan
- g. Data cuaca
- h. Data penelitian genomika hewan dan tumbuhan
- i. Data media sosial



Sumber: Sharma dan Parhi (2018)

Gambar 6.2 Siklus manajemen siber-fisik dari *Smart Farming* ditingkatkan dengan penyimpanan berbasis *cloud* dan manajemen data.

Teknologi muncul untuk memberikan wawasan yang dapat ditindaklanjuti langsung ke tangan petani. Ada permintaan yang lebih besar untuk informasi karena variabilitas cuaca ekstrem memerlukan praktik pertanian baru. Wawasan lokal dan tepat waktu membantu petani dalam membuat keputusan penting.

Gambar 6.2 memberikan representasi skema penggunaan manajemen data berbasis cloud untuk praktik pertanian cerdas. Analisis, metode, dan pendekatan *big data* dapat membantu dalam memberikan informasi yang tepat waktu kepada para pelaku agrobisnis dan petani yang pada gilirannya akan membantu mereka menjadi lebih tangguh.

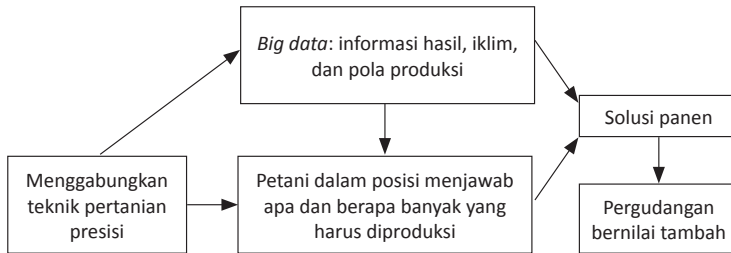
C. Solusi *Big Data*

Implementasi solusi *big data* berarti optimalisasi informasi di seluruh rantai nilai pertanian untuk mendorong keputusan yang berwawasan di lapangan dan secara *real-time*. Teknologi ini memungkinkan petani dan pemangku kepentingan agrobisnis lain untuk menganalisis berbagai sumber data untuk wawasan yang lebih baik. Hal ini, pada gilirannya, memperluas opsi analitik dan prediktif yang mengarah ke hasil yang lebih baik.

Potensi teknologi *big data* dapat berdampak pada agrobisnis dengan cara:

1. Data cuaca
2. Peningkatan perkiraan hasil produksi
3. Bibit dan ternak yang dioptimalkan dengan lebih baik serta metodologi baru yang meningkatkan hasil dan produksi
4. Pengiriman barang yang diproduksi lebih cepat ke pusat distribusi dan konsumen
5. Keputusan dan peringatan *real-time* berdasarkan data dari lahan
6. Produksi terintegrasi dan data kinerja bisnis untuk pengambilan keputusan yang lebih baik
7. Data kinerja yang dirasionalisasikan di berbagai geografi

Big data dapat membentuk dasar untuk berbagai kemampuan baru, termasuk mengidentifikasi korelasi antara lahan pertanian dan cuaca serta data komoditas untuk irigasi, pemupukan, dan panen tanaman yang optimal. Analitik prediktif dapat digunakan untuk memenuhi permintaan dan memungkinkan pemasok menyesuaikan produksi dengan permintaan. Memiliki wawasan dan pemahaman tentang korelasi dan efek dari pola cuaca pada penawaran dan permintaan dapat digunakan untuk memengaruhi keputusan bisnis. Gambar 6.3 menunjukkan representasi penggunaan *big data* dalam berbagai tahapan rantai pasok pertanian. Pengambilan keputusan dapat dilakukan di setiap fase rantai pasok untuk hasil yang efektif ketika sistem *big data* tersebut terintegrasi dengan rantai aliran produk.



Sumber: Sharma dan Parhi (2018)

Gambar 6.3 Big Data dan Pergudangan Bernilai Tambah

1. Batasan/Tantangan Aplikasi *Big Data*

Meskipun aplikasi *big data* memberikan jawaban untuk memberi makan 10 miliar pada tahun 2050, ada beberapa tantangan serius yang terkait dengan aplikasinya yang harus dihadapi sebelum potensi penuh *big data* disalurkan. Beberapa yang menonjol adalah sebagai berikut:

- a. Kepemilikan data
- b. Biaya alat dan sistem pendukung keputusan
- c. *Bandwidth*, kualitas, dan kurasi data
- d. Disambiguasi data

- e. Konektivitas
- f. Keamanan siber
- g. Penyimpanan data

Solusi paling tepat untuk mengatasi beberapa tantangan yang disebutkan di atas adalah melalui alat analisis data *open-source* dan didanai publik untuk digunakan dalam domain publik.

Penggabungan pertanian dan *big data* telah digembar-gemborkan sebagai kemajuan terbesar dalam teknologi produksi pangan sejak Revolusi Hijau antara tahun 1940-an dan akhir tahun 1960-an ketika salah satu gelombang terbesar penelitian dan transfer teknologi memacu pertumbuhan produksi pertanian di seluruh dunia, terutama di negara berkembang. Dengan semua data dan metode penyebaran data (analisis *big data*), kita bisa menciptakan produksi pertanian, sistem pelacakan, dan pemantauan yang bersumber secara lokal dan *real-time*. Hal ini pada akhirnya akan membantu menciptakan sistem informasi ketahanan pangan/gizi. *Big data* akan membantu meningkatkan aksesibilitas pangan dengan memberikan wawasan tentang permintaan dan penyimpanan. Aspek lainnya adalah nilai tambah pergudangan yang dimungkinkan oleh analisis *big data* ini berupa pusat keunggulan bagi petani dan memberikan solusi pasca panen yang lengkap. Data sesuai permintaan akan memungkinkan pergudangan yang efisien, rantai pasok yang tangguh dan mudah beradaptasi, dan secara keseluruhan, membantu membuka jalan bagi integrasi pasar yang lebih baik. Analisis *big data* akan memberikan informasi dalam bentuk yang dapat digunakan tentang berapa banyak yang harus diproduksi, disimpan, dan didistribusikan. Kita juga membutuhkan solusi inovatif yang berkelanjutan dan meminimalkan jejak lingkungan pertanian, analisis *big data* adalah salah satunya.

D. Mengintegrasikan *Big Data* ke dalam Rantai Pasok Pangan

Pertanian presisi sekarang menjadi faktor penting dalam upaya untuk memperluas produksi pangan dunia. Kemunculan dan adopsi sistem

pertanian cerdas di bidang pertanian, seperti penyemprotan kolaboratif, detektor kelembapan, teknik irigasi cerdas, dan infrastruktur cerdas lainnya memberikan beberapa peluang untuk sistem rantai pasok pangan. Tujuan dari pertanian cerdas adalah untuk meningkatkan produktivitas melalui pengurangan semua jenis pemborosan pangan. Selain itu, salah satu ancaman utama dalam ketahanan pangan adalah pemborosan pangan dan terbukti dengan perkiraan 50% pangan yang diproduksi terbuang karena kurangnya pengelolaan yang tepat dari produksi hingga ritel. Mempertimbangkan semua masalah ini, banyak negara terlibat dalam melakukan penelitian tentang pemborosan pangan dan telah mengambil prioritas untuk meningkatkan ketahanan pangan dan keberlanjutan sistem pangan. Di sini, teknologi informasi dapat digunakan dalam sistem penyimpanan yang baik, yang dapat memprediksi kualitas gabah saat ini dengan memantau berbagai faktor seperti suhu, cahaya, kelembapan, hama dan mengendalikan situasi sesuai dengan kebutuhan.

Penerapan secara luas dari aplikasi internet di masa depan diharapkan dapat mengubah cara rantai pasok pangan yang dapat dioperasikan dengan cara yang belum pernah terjadi sebelumnya. Untuk memaksimalkan penggunaan teknologi ini, mereka harus dimasukkan ke dalam rantai pasok pangan dan diselaraskan dengan proses bisnis dengan cara yang tepat. Selain itu, teknologi belum dimanfaatkan dengan baik di beberapa negara berkembang, terutama di bidang pertanian. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengembangkan sistem pengukuran dan pengendalian yang cerdas, aman, otomatis dan *real-time*, yang dapat membantu dalam sistem rantai pasok pangan. Dengan demikian, adopsi solusi cerdas dapat membantu mengurangi pemborosan pangan, meningkatkan produktivitas, mengurangi biaya produksi dan transportasi dalam rantai pasok pangan. Beberapa laporan menyatakan bahwa sejumlah besar pangan terbuang karena berbagai alasan (misalnya dalam Gustavsson dkk., 2019; Hamouda & Msallam, 2020). Ada kebutuhan untuk mengambil pendekatan holistik terhadap rantai pasok pangan untuk memastikan inovasi dalam pengolahan pangan melalui penggunaan perangkat

Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK). Bagian ini menyajikan kerangka kerja untuk pengumpulan dan agregasi data yang aman dan efisien dalam sistem rantai pasok pangan. Arsitektur yang diusulkan diharapkan dapat membantu mengurangi risiko dalam pengolahan pangan pada beberapa tahap.

Ada permintaan yang berkembang untuk menyelidiki teknik otomatis untuk mengidentifikasi strategi dalam mengurangi pemborosan pangan (Yu dkk., 2010; Zhou dkk., 2015). Agrikultura di seluruh dunia sekarang menyadari kebutuhan mendesak akan kemampuan ilmu data untuk membuka dan meningkatkan kecerdasan yang tersimpan dalam akumulasi *big data*, layanan *big data* berbasis cloud dan informasi dalam agrobisnis untuk memastikan ketahanan pangan. Solusi teknis yang ada digunakan dalam kontrol, pemantauan dan dokumentasi proses pertanian; transportasi, logistik, dan lingkungan, hanyalah contoh terpilih tentang bagaimana 'gelombang baru' layanan ini dapat diakses oleh Sistem Informasi Manajemen Pertanian/*Farm Management Information System* (FMIS). Teknologi pertanian saat ini menopang sejumlah standar komunikasi untuk bertukar informasi melalui sensor, perangkat, dan aktuator dalam *Wireless Sensor Network* (WSN). Sejumlah standar komunikasi seperti Zigbee, WiFi, dan ISOBUS menjadi teknologi pendukung dalam pertanian yang ada untuk bertukar informasi. Dalam sistem pasokan pangan pintar, sensor/aktuator dapat dihubungkan, dipanggil, atau dinonaktifkan melalui internet. Hal ini memungkinkan pemantauan, pengelolaan, pelacakan dan identifikasi cerdas dari informasi penting. Selain itu, seiring dengan dihasilkan, dikomunikasikan dan diprosesnya *big data*, keamanan menjadi masalah utama dalam aplikasi tersebut.

Data dalam sistem rantai pasok pangan biasanya dikumpulkan menggunakan beberapa metode, termasuk data sensor RFID dan nirkabel, data pelacakan aset otomatis dan semi otomatis; data komunikasi pergudangan dan transportasi; GPS, GPRS dan sistem lokasi untuk pelacakan kendaraan dan pengiriman; sistem pengawasan untuk kesadaran situasi; komunikasi publik terkait pergerakan barang dan aset lokal dan internasional; wadah dan sistem pelacakan konten;

dan sistem pelacakan kendaraan dan rekayasa seperti kotak hitam pada kendaraan berat. Proses ini menghasilkan aliran data yang besar. Parvin dkk. (2018) menyajikan sistem pemantauan dan pengendalian otomatis cerdas melalui pemanfaatan potensi sistem siber fisik, yang dapat digunakan untuk memantau sistem penyimpanan biji-bijian. Namun, masalah keamanan pengumpulan dan transmisi data tidak dibahas. Gambar 6.5 menunjukkan metode yang diusulkan untuk pengumpulan dan agregasi *big data* dalam rantai pasok pangan (Parvin dkk., 2018). Ketika mengintegrasikan metode ke dalam rantai pasok pangan, beberapa tantangan muncul. Pertama, jumlah data yang dikumpulkan dan digabungkan meningkat secara dramatis sehingga menghasilkan data yang besar. Kedua, keamanan data menjadi perhatian utama karena keragaman sumber data, saluran komunikasi, dan node pemrosesan data dalam rantai pasok. Akhirnya, untuk memanfaatkan data dengan baik, metode pemrosesan dan analisis yang efisien harus digunakan. Gambar 6.4 menggambarkan pengumpulan dan pemrosesan data dalam sistem rantai pasok pangan. Pekerjaan ini akan mengusulkan kerangka kerja yang dimaksud untuk mengatasi masalah dan memberikan dukungan untuk keamanan *big data* dalam sistem rantai pasok pangan. Berikut adalah tujuan yang dapat dicapai dengan memiliki sistem tersebut:

- 1) Pengembangan kerangka kerja pemantauan dan infrastruktur informasi yang diaktifkan IoT untuk menyediakan pelacakan dan penelusuran barang pertanian secara *real-time*. Selain itu, ini akan mengintegrasikan teknologi logistik berbasis silo yang digunakan untuk pelacakan barang pertanian, seperti GPS dan GPRS, untuk menyediakan mekanisme dalam melacak dan menelusuri pergerakan barang, manajemen aset, dan kemitraan dengan jaringan produsen.
- 2) Pengembangan sistem komponen perangkat lunak dengan utilitas penambangan data besar yang dapat menganalisis, memahami, dan memperoleh kecerdasan dari aliran data yang masuk di bidang pertanian. Representasi pengetahuan yang seragam ten-

tang elemen-elemen penyusun akan digunakan di antara sistem logistik yang berbeda.

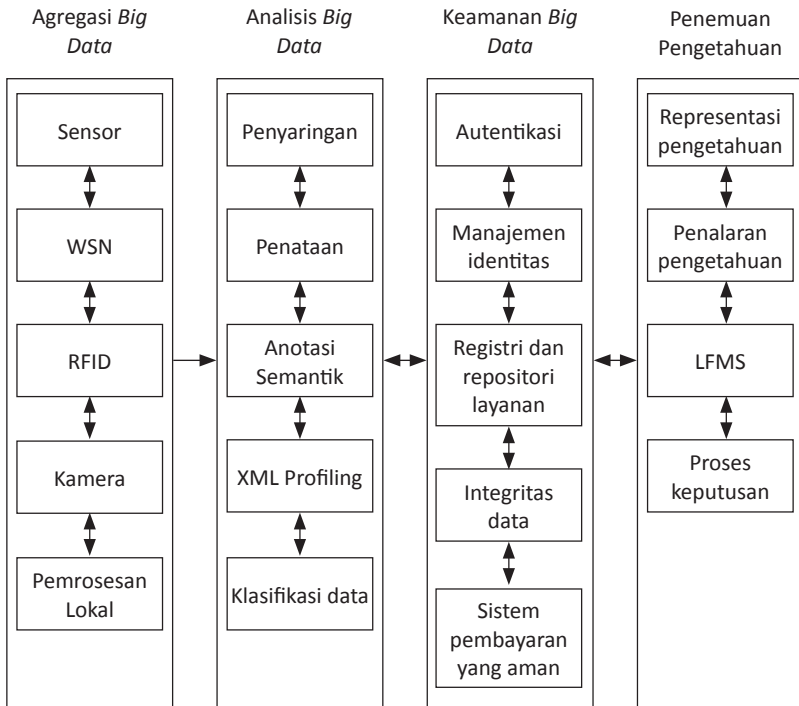
- 3) Pengembangan mekanisme keamanan untuk mengamankan aliran *big data* dengan cara yang andal. Tujuan ini akan dicapai melalui pengembangan *Intrusion Detection System* (IDS) yang cerdas untuk melindungi data yang masuk dari pencuri, kehilangan, kehancuran dan untuk menyediakan metode keaslian berbasis RFID yang dapat dilacak dalam rantai pasok pangan.
- 4) Pengembangan analitik *big data* dan teknik cerdas untuk mewakili dan menafsirkan data yang disimpan, sehingga memungkinkan pengambilan keputusan yang tepat. Ini akan memungkinkan visualisasi informasi *real-time*, dan membuat keputusan yang terinformasi dan andal tergantung pada data yang dikumpulkan.
- 5) Membangun sistem prototipe cerdas untuk mengevaluasi kelayakan pendekatan, teknik, dan metodologi dalam rantai pasok pangan.
- 6) Penggunaan teknologi pertanian yang hemat biaya dan menerapkan sistem pada area proyek untuk meningkatkan efisiensi rantai pasok pangan dengan mengurangi jumlah pangan yang terbuang karena penyimpanan yang buruk dan logistik yang tidak memadai serta infrastruktur rantai pasok selama transportasi, penyimpanan, penanganan pangan, pengemasan, distribusi, dan pemrosesan.

1. Kerangka Keamanan *Big Data* untuk Rantai Pasok Pangan

Banyak sistem rantai pasok produk pertanian tradisional masih bergantung pada beberapa metode klasik, seperti pemindaian manual dan kode batang untuk pengumpulan data dan pemrosesan informasi penting tentang produk pertanian. Akibatnya, keterlambatan, kesalahan, dan kurangnya informasi sangat umum terjadi pada rantai pasok, yang pada gilirannya membuat arus logistik dan informasi terhalang dalam proses transmisi. Dalam hal ini, penerapan *internet of things* (IoT) dapat memainkan peran penting untuk membangun sistem

cerdas yang dapat mengontrol dan melacak kualitas produk pertanian dengan menggabungkan rantai pasok dengan petani.

Pada bagian ini, Gawanmeh dkk. (2019) memperkenalkan kerangka kerja yang diusulkan untuk mengintegrasikan keamanan *big data* ke dalam sistem manajemen rantai pasok pangan. Sistem ini dimaksudkan untuk menyediakan layanan serba guna kepada perusahaan, pemerintah, dan sektor publik dalam sistem rantai pasok. Data biasanya dikumpulkan dalam sistem rantai pasok dari berbagai sumber, ini menghasilkan sejumlah besar aliran data *real-time*



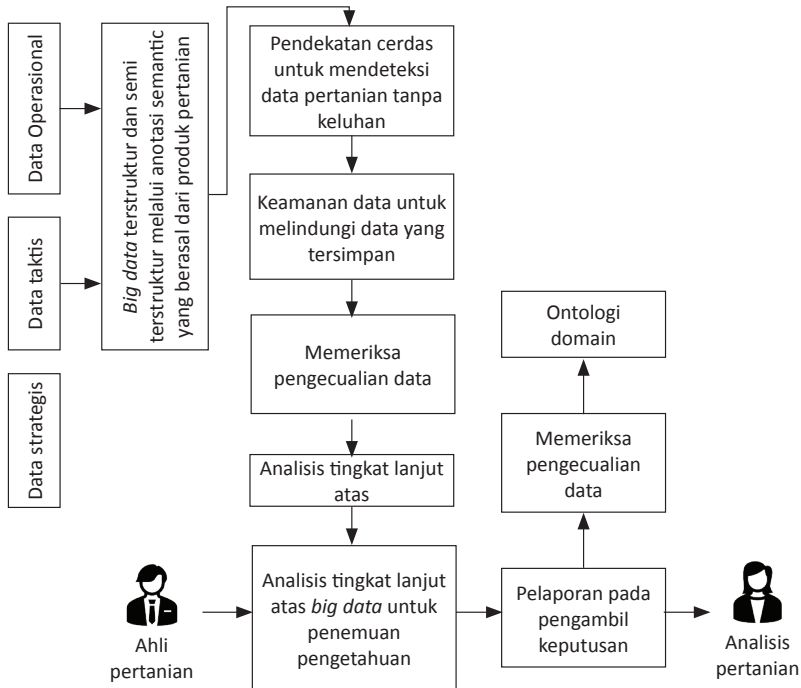
Sumber: Gawanmeh dkk. (2019)

Gambar 6.4 Kerangka Kerja untuk Mengintegrasikan Keamanan *Big Data* ke dalam Rantai Pasok Pangan

dari berbagai sektor pertanian yang dimasukkan ke dalam jaringan logistik, yang menghasilkan *big data*. Sistem yang diusulkan akan dapat mengumpulkan data yang masuk dalam berbagai format, dan dari berbagai perangkat; menyimpannya di platform yang aman, dan menganalisis *big data* yang masuk serta memperoleh kecerdasan darinya untuk meningkatkan efisiensi operasional rantai pasok produk pertanian dan mempromosikan pengembangan sektor pertanian. Bagian ini bertujuan untuk mengembangkan teknik yang lebih baik dalam menangkap, mengumpulkan, mengamankan, dan menganalisis *big data* dalam sistem rantai pasok pertanian. Realisasi kerangka yang diusulkan dieksplorasi melalui beberapa langkah seperti yang dijelaskan pada Gambar 6.4.

Kerangka kerja dibagi menjadi empat bagian. Pertama adalah bagian pengumpulan dan agregasi data, di mana data dikumpulkan melalui berbagai metode, dari bahan pertanian, terutama melalui perangkat berkemampuan IoT. Langkah kedua adalah analisis data, di mana data yang terkumpul perlu dibersihkan dan disaring dari *noise*. Selain itu, anotasi semantik untuk klasifikasi dan pembuatan profil data akan diterapkan berdasarkan data terstruktur dan tidak terstruktur. Beberapa pertimbangan penting seperti ekstraksi, identifikasi, asosiasi data harus diperhitungkan selama anotasi teks untuk memperkaya data yang tidak terstruktur secara semantik. Setelah anotasi semantik selesai, profil XML dibuat yang berisi *big data* beranotasi dan logistik pertanian serta profil sistem rantai pasok. Gambar 6.5 menunjukkan algoritma yang diusulkan untuk analisis data besar dalam rantai pasok pertanian.

Bagian ketiga didedikasikan untuk keamanan data besar dalam rantai pasok. Sangat umum bahwa perangkat dengan sumber daya terbatas, seperti yang digunakan dalam konteks pertanian, digunakan tanpa keamanan. Oleh karena itu, memastikan masalah keamanan selama pencarian informasi produk pertanian adalah salah satu hal yang kritis. Meskipun ada beberapa metode keamanan yang dikembangkan dengan baik di IoT, tidak ada mekanisme atau sistem deteksi intrusi, yang dikembangkan untuk mengamankan IoT dalam



Sumber: Gawanmeh dkk. (2019)

Gambar 6.5 Algoritma pemrosesan yang diusulkan untuk analisis *Big Data* dalam rantai pasok pertanian pangan.

sistem rantai pasok pertanian. Mekanisme seperti itu diperlukan untuk memastikan bahwa pengiriman dan penggunaan layanan dapat dipercaya dan memenuhi persyaratan keamanan dan privasi. Oleh karena itu, perlu dikembangkan sistem deteksi intrusi ringan untuk mendukung jaringan nirkabel yang umum digunakan di IoT untuk sistem rantai pasok pertanian. Selain itu, sistem yang andal seperti itu perlu mengembangkan mekanisme keamanan data yang ringan, namun sangat andal, dalam konteks IoT dalam rantai pasok pertanian. Dari fungsionalitas yang ditawarkan sistem, keamanan

adalah yang paling penting untuk menyampaikan rasa percaya dan keandalan dalam penggunaan sistem. Para petani harus diyakinkan bahwa meskipun data disimpan di cloud, data tersebut tetap bersifat pribadi. Hal ini dapat dipastikan melalui penggunaan mekanisme pendeteksian penipuan dan penyusupan yang kuat.

Bagian terakhir dari kerangka yang diusulkan adalah penemuan pengetahuan. Sebagai bagian dari integrasi dan penambahan *big data*, kerangka kerja ini dimaksudkan untuk menyelesaikan, menggabungkan, dan mengintegrasikan informasi secara otomatis menggunakan sistem pengetahuan para ahli melalui metodologi representasi dan penalaran pengetahuan. Sistem manajemen pertanian lokal/*local farm management system* (LFMS) mengintegrasikan nilai-nilai sensor yang dikumpulkan melalui antarmukanya, kemudian ditransmisikan ke pusat kendali untuk manajemen. Dalam proyek ini, semua argumen yang diterima oleh pakar pertanian yang berbeda akan dianalisis untuk menyelesaikan konflik dan membangun pohon argumentasi yang memisahkan dan menghubungkan argumen yang mendukung dan menentang situasi yang sedang dipertimbangkan, dan menghasilkan laporan untuk mendukung proses pengambilan keputusan tergantung pada informasi produk pertanian.

Untuk mendapatkan wawasan berharga tentang cara kerja sistem rantai pasok pangan, penting untuk menemukan asosiasi yang berguna di antara konsep-konsep yang diambil dari berbagai komponen dan bagian dari rantai pasok. Untuk mencapai ini, kita perlu mengembangkan ontologi domain (Öhgren, 2004) untuk interoperabilitas informasi, integrasi *big data* antara informasi yang berasal dari berbagai bagian rantai pasok serta asimilasi pengetahuan. Hal ini dapat membantu mengidentifikasi kejadian penting atau informasi baru tentang produk pertanian dalam sistem transportasi dan logistik pertanian. Asosiasi yang berguna dapat dicapai dengan memilih peringatan otomatis tentang keadaan anomali untuk mengidentifikasi objek yang perilakunya menyimpang sehubungan dengan seperangkat aturan yang dikodifikasi. Tujuan utama dari deteksi abnormalitas ini adalah sebagai upaya identifikasi. Setelah informasi baru diidentifikasi

atau informasi yang ada perlu diperbarui tentang produk pertanian, perubahan akan dimasukkan ke dalam domain ontologi dan *big data* terintegrasi dianalisis untuk peninjauan lebih lanjut.

Akhirnya produksi, penanganan dan distribusi pangan dianggap sebagai masalah potensial, baik di negara maju maupun negara berkembang. Diperkirakan kehilangan pangan dalam jumlah besar terjadi setelah tahap pemanenan di negara berkembang. Oleh karena itu, beberapa metode sedang diusulkan untuk memantau dan mengontrol sistem rantai pasok pangan yang menggunakan *big data*. Usaha ini membutuhkan mekanisme keamanan yang tepat untuk melindungi data. Bagian ini mengusulkan mekanisme keamanan untuk melindungi *big data* dalam sistem pasok pangan. Langkah selanjutnya adalah memiliki implementasi prototipe, dengan pengumpulan dan pemrosesan data *real-time* yang melibatkan validasi penerapan arsitektur ketahanan pangan yang diusulkan dengan membuat sistem pemantauan data pertanian yang cerdas. Proses validasi akan dilakukan melalui agregasi dan pengumpulan data praktis, kemudian memberikan implementasi untuk kerangka kerja keamanan dengan dukungan sistem *cloud* dan *big data*.

E. Aplikasi *Big Data* untuk Manajemen Keberlanjutan Rantai Pasok Produk Sampingan

Sejak awal tahun 1970-an, pengaruh manusia terhadap bumi dan sumber dayanya—melalui perkembangan ekonomi, ilmu pengetahuan, dan teknologi masyarakat industri kita—terus meningkat, dan menghasilkan dampak yang semakin besar terhadap lingkungan. Kesadaran akan masalah ekologi ini telah memicu ide-ide baru untuk pembangunan yang lebih ramah lingkungan. Laporan Brundtland (1988) menandai dimulainya “pembangunan berkelanjutan”, dengan definisi pertama istilah ini sebagai “pembangunan yang memenuhi kebutuhan saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri.” Pembangunan

berkelanjutan dengan demikian memiliki tiga tujuan utama: efisiensi ekonomi, keadilan sosial, dan keberlanjutan lingkungan. Ini membutuhkan perubahan besar dalam cara kita berpikir, merancang dan menggunakan sumber daya, dan dalam struktur ekonomi dan sosial untuk pola konsumsi dan produksi. Pemikiran siklus hidup dapat membantu meningkatkan kinerja lingkungan, manfaat sosial dan ekonomi, yang dapat diperoleh dari pendekatan yang mempertimbangkan siklus hidup penuh rantai pasok pertanian. Memang, pendekatan ini dapat digunakan untuk meminimalkan dampak di beberapa area, sekaligus mencegah dampak lebih lanjut di area lain. Pembangunan berkelanjutan membutuhkan pertimbangan simultan yang stabil dari aspek ekonomi, lingkungan dan sosial. Sebuah model bisnis baru untuk pembangunan yang lebih berkelanjutan baru-baru ini muncul: ekonomi sirkular/*circular economic* (CE). Model ini membantu mendamaikan aspek ekonomi, lingkungan dan sosial. Ghisellini dkk. (2016) telah meninjau artikel ilmiah tentang CE dan telah membahas asal-usul CE serta prinsip dan batasan model CE. Di Prancis, ekonomi sirkular termasuk dalam sembilan bidang SNTEDD (*National Ecological Transition Strategy for Sustainable Development*/Strategi Transisi Ekologi Nasional untuk Pembangunan Berkelanjutan) yang diusulkan oleh pemerintah Prancis pada tahun 2015. Istilah “transisi ekologis” digunakan untuk menggambarkan pergeseran menuju pembangunan yang lebih berkelanjutan. Transisi ini merupakan perhatian masyarakat yang utama dan akan membutuhkan pengetahuan dan keterampilan yang luas dari berbagai ilmu yang berbeda.

Transformasi digital masyarakat saat ini telah membawa era baru dalam industri, yang dapat digambarkan sebagai “Industri 4.0”, yang dapat memfasilitasi transisi ekologis. Industri telah banyak berubah sejak awal pada abad ke-18. Empat revolusi industri sekarang dianggap telah terjadi. Otomatisasi telah memberikan peluang untuk mengoptimalkan proses manufaktur dan meningkatkan produktivitas melalui desain mesin yang lebih fleksibel, ergonomis, dan lebih aman. Salah satu prinsip inti Industri 4.0 adalah manajemen data, mulai

dari pengumpulan hingga analisis, dan integrasi teknologi informasi, manufaktur, dan sistem operasi sebagai cara untuk memperoleh data secara lebih tepat waktu, cepat, dan fleksibel. Transformasi dari Industri 3.0 ke Industri 4.0 ini sering disebut sebagai “proses digitalisasi” atau “transisi digital”. *Big data* dan metode serta alat terkait membentuk salah satu pilar yang mendukung transformasi ini.

Big data merupakan aset informasi dengan volume, kecepatan, dan variasi yang tinggi sehingga sulit untuk dikelola dengan alat umum. Teknologi *big data* dapat diterapkan pada CE dan ekologi industri. Xu dkk. (2015) mengeksplorasi kemungkinan kontribusi *big data* terhadap ekologi industri melalui beberapa contoh yang menggabungkan dua domain ini. *Knowledge Engineering* (KE) merupakan teknik dari sistem berbasis pengetahuan yang sekarang dapat diterapkan pada *big data*. Pemikiran siklus hidup jelas akan mendapat manfaat dari kombinasi sejumlah besar data yang sekarang tersedia dengan teknik KE untuk eksploitasinya. Ini akan memungkinkan pemerolehan data tambahan dan data pengganti dalam situasi di mana data tertentu tidak dapat dikumpulkan. Pendekatan ini membutuhkan serangkaian hipotesis. Tujuan utama KE adalah untuk menyusun pengetahuan menjadi representasi formal untuk dieksploitasi oleh komputer. Penataan data ini sangat penting ketika menangani data dalam jumlah besar, yang mendorong perangkat lunak statistik standar hingga batasnya. Metode KE menggunakan kosakata standar untuk menyusun data eksperimen. Penataan ini mungkin didasarkan pada ontologi yang mewakili data eksperimen yang diminati.

Ontologi adalah model representasi pengetahuan yang dapat digunakan untuk menghubungkan data dan menyediakan alat otomatis untuk penalaran (Doan dkk., 2012). Setelah data terstruktur menjadi ontologi, mereka dapat dihomogenisasi dan digunakan untuk mendefinisikan dan menghitung kriteria untuk penilaian proses. Namun, hanya sedikit literatur yang mengeksplorasi penerapan pendekatan ini dalam domain ini. Belaud dkk. (2019) merancang sistem data dan informasi yang intensif untuk mengelola pembangunan berkelanjutan dalam kerangka kawasan ekoindustri. *Big data* dapat digunakan untuk

melengkapi data latar belakang. Sistem latar belakang terdiri dari semua proses lain yang berinteraksi langsung dengan sistem latar depan. “Penilaian siklus hidup intensif data” (Bhinge dkk., 2015) menggunakan pendekatan berbasis KE untuk mengadaptasi metode penilaian siklus hidup/*life-cycle assessment* (LCA), menggabungkan perkembangan teknologi yang dapat memodifikasi hasil LCA untuk produk tertentu dari waktu ke waktu. Akhirnya, *big data* dan KE dapat digunakan untuk mewakili siklus hidup suatu produk, dengan semua aliran perantara, emisi, dan ekstraksi, dalam LCA berbasis ontologi.

Sebagai contoh, Eropa menghasilkan lebih dari 700 juta ton limbah pertanian setiap tahunnya (Pawelczyk, 2005). Proyeksi peningkatan populasi dunia tidak diragukan lagi akan disertai dengan peningkatan produksi sampah dan dampaknya terhadap lingkungan. Selain itu, aktivitas manusia mengurangi ketersediaan lahan pertanian, dengan dampak yang tak terhindarkan pada sistem pertanian. Teknologi pertanian baru harus memfasilitasi intensifikasi berkelanjutan, pendekatan “terbaik” untuk masa depan pertanian. Namun, intensifikasi ini akan menyebabkan lebih banyak pemborosan produk dan sumber daya. Parametrisasi sampah di bidang pertanian menjadi tantangan utama dalam upaya mencapai keberlanjutan. Terdapat dua kelas limbah: limbah dari input, seperti air atau pupuk, dan limbah karena konversi atau pemrosesan bahan yang tidak lengkap dalam rantai pasok, dari produksi tanaman hingga konsumsi pangan. Limbah pertanian kelas kedua ini termasuk produk sampingan lignoselulosa, yang sesuai dengan senyawa struktural penting dari dinding sel tanaman lignifikasi. Biomassa lignoselulosa adalah salah satu sumber daya terbarukan yang paling melimpah dan termurah di Bumi. Biokonversinya merupakan pendekatan yang menjanjikan untuk produksi bioenergi, biomolekul, dan biomaterial. Proses ini melibatkan hidrolisis enzimatis biomassa untuk melepaskan glukosa. Biomassa lignoselulosa memiliki empat komponen utama: selulosa, hemiselulosa, lignin, dan asam fenolik. Hanya dua dari komponen ini, yaitu selulosa dan hemiselulosa, yang dapat dihidrolisis untuk menghasilkan glukosa. Untuk keberlanjutan secara keseluruhan,

proses yang digunakan untuk menghasilkan sumber daya hayati ini harus berkelanjutan.

Penilaian keberlanjutan semakin meningkat yang dimasukkan ke dalam proses dalam domain pertanian pangan (Food SCP Round Table European Commission, 2012). Wolfert dkk. (2017) mengeksplorasi pertanian pintar melalui manajemen pertanian, proses pertanian, organisasi manajemen jaringan dan teknologi manajemen jaringan. Kerangka teoretis terintegrasi yang dikembangkan oleh Horton dkk. (2016) mempertimbangkan rantai pasok pertanian pangan—dari lahan hingga manusia—dengan mengintegrasikan *big data* dan data untuk semua aktor. Sebuah contoh ekosistem pertanian pangan generik telah dibuat, termasuk aktor kunci, pengaruh eksternal, komponen, dan dampak.

Bagian ini fokus pada valorisasi limbah pertanian dan produk sampingan, dengan mempertimbangkan cara-cara di mana *big data* dapat mendukung pengelolaan keberlanjutan. Perlakuan awal biomassa lignoselulosa sebelum hidrolisis enzimatis sangat penting untuk memastikan hasil yang baik. Berbagai metode pra-perlakuan telah dipelajari secara rinci selama tiga puluh tahun terakhir. Namun, tetap sulit untuk memilih antara proses yang berbeda ini dalam hal biomassa yang tersedia dan kualitas produk, serta kriteria yang kurang untuk memandu pilihan ini. Berfokus pada keberlanjutan, maka perbandingan berbagai proses pra-perlakuan dan teknologi yang terlibat dalam hal dampak ekonomi dan lingkungan perlu dilakukan. Dampak lingkungan dapat dinilai dengan berbagai cara seperti metode penilaian siklus hidup (LCA) karena pendekatan ini benar-benar sistemik dan didasarkan pada pemikiran siklus hidup. LCA mengevaluasi aspek lingkungan dan potensi dampak lingkungan sepanjang siklus hidup suatu produk atau proses. Pada bagian selanjutnya, penerapan pendekatan pada sebuah studi kasus: manajemen keberlanjutan untuk empat proses pertanian pangan, memandu keputusan yang berkaitan dengan rantai pasok dan teknologi dalam produksi beras.

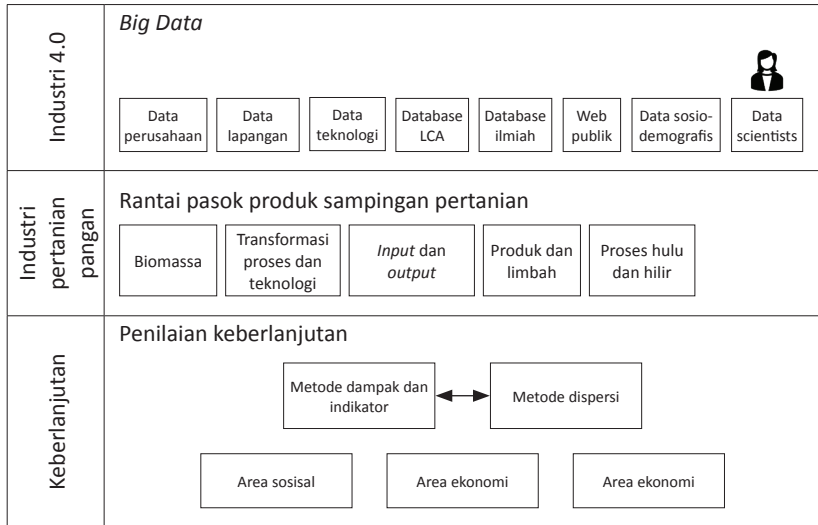
1. *Big Data* untuk Rantai Pasok Produk Sampingan Pertanian

Big data dapat digunakan di berbagai tingkat manajemen keberlanjutan. Salah satu tantangan dalam valorisasi produk sampingan dalam rantai pasok pertanian adalah merancang proses yang “terbaik”. Rantai pasok valorisasi produk sampingan mencakup beberapa tahap operasional, mulai dari pemilihan biomassa hingga pembuangan limbah, dan melewati berbagai tahap transformasi dan proses hulu/hilir. Setiap tahap dapat didefinisikan dengan metode dan indikator dampak yang berkaitan dengan tiga bidang: ekonomi, lingkungan dan sosial. Setelah berbagai tahapan dijelaskan, kita dapat memilih biomassa dan proses yang paling tepat dengan alat pendukung keputusan, yang memperhitungkan semua indikator di setiap area. Tujuan utama dari pendekatan ini adalah untuk menganalisis sistem penilaian yang berbeda dan memberikan dukungan untuk pengambilan keputusan berbasis kelompok. Hubungan antara sistem pendukung keputusan dan berbagai data memungkinkan memperlakukan berbagai jenis data sambil mempertahankan *throughput* tinggi untuk pemrosesan data besar. Berbagai data yang digunakan tercantum pada Gambar 6.6. Data web publik tersedia bagi siapa saja yang memiliki *browser web* dan mencakup data cuaca, harga dunia untuk bahan mentah, dan faktor dampak untuk metode LCA, misalnya ReCiPe.

Data perusahaan adalah data yang diperoleh dari perusahaan pada setiap tahap kegiatan mereka (dari pendirian perusahaan sampai penutupannya). Dalam hal valorisasi produk samping pertanian, “perusahaan” adalah *biorefinery*, dan setiap *biorefinery* memiliki data proses transformasinya sendiri. Data lapangan adalah data yang menggambarkan kualitas biomassa (kadar selulosa), serta kadar air, misalnya. Data teknologi berhubungan dengan teknologi yang digunakan dalam proses valorisasi, seperti teknologi pemotongan dan penggilingan, input, kecepatan rotasi dan nilai energi. Basis data LCA adalah basis data yang banyak digunakan di LCA, seperti EcoInvent dan Gabi. *Database* ilmiah adalah *database* artikel ilmiah.

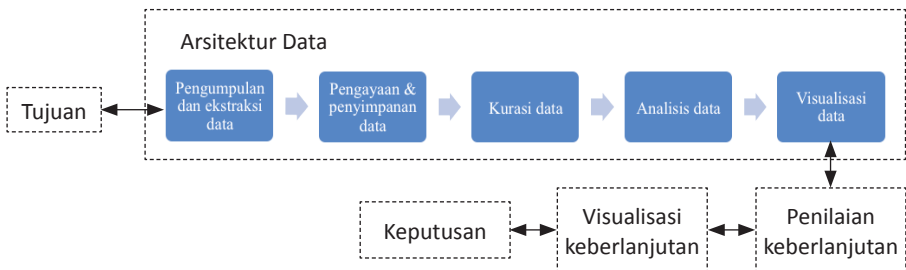
Terdapat tiga sumbu utama yang menarik pada Gambar 6.6. Alur kerja untuk mendukung hubungan antara *big data* dan penilaian keberlanjutan untuk valorisasi rantai pasok produk sampingan pertanian dirinci dalam bagian selanjutnya. Pendekatan ini disesuaikan dengan industri agribisnis pangan dengan memanfaatkan konsep Industri 4.0 dan manajemen keberlanjutan. Secara khusus, pilar *Big data* dari Industri 4.0 dan penilaian keberlanjutan dari manajemen keberlanjutan dipertahankan. Gambar 6.6 mengilustrasikan salah satu jalur transformasi digital berdasarkan integrasi *big data* ke dalam industri pertanian pangan. Valorisasi rantai pasok produk sampingan pertanian dapat dibagi menjadi lima elemen: biomassa lignoselulosa, proses dan teknologi transformasi, *input* dan *output*, produk dan limbah, serta proses hulu dan hilir. Masing-masing kategori tersebut dapat digambarkan dengan data yang heterogen dan dapat memengaruhi kategori lainnya, misalnya jenis biomassa dapat memengaruhi jenis proses transformasi. Semua data penting dan memengaruhi indikator sosial, ekonomi dan lingkungan. Dalam keberlanjutan valorisasi produk samping pertanian, tujuannya adalah untuk mengintegrasikan semua data ke dalam desain proses, tetapi ini sangat sulit, misalnya untuk penilaian lingkungan yang sesuai dengan pemikiran siklus hidup, data proses diperlukan. Memperoleh data seperti itu memakan waktu dan membutuhkan eksperimen yang mahal. Alternatifnya, data dapat diperoleh dari publikasi ilmiah dan sumber lain, dengan penggunaan *big data* secara otomatis atau manual. Memang, dimungkinkan untuk menggunakan data ini dan, oleh karena itu, untuk mendapatkan data latar depan untuk analisis keberlanjutan, sedangkan data latar belakang umumnya tersedia dari basis data LCA.

Integrasi penilaian keberlanjutan ke dalam industri pertanian pangan akan memfasilitasi transisi ekologis. Pendekatan dibagi menjadi lima langkah utama (Gambar 6.7): tujuan, arsitektur data, penilaian keberlanjutan, visualisasi keberlanjutan, dan keputusan. Setiap langkah memiliki sublangkahnya sendiri dan disarankan untuk berpindah ke sana kemari di antara berbagai langkah. Langkah



Sumber: Belaud

Gambar 6.6 *Big data* dan penilaian keberlanjutan untuk valorisasi produk sampingan pertanian



Sumber: Belaud

Gambar 6.7 Berbagai Langkah dalam Pendekatan

kedua dari metodologi yang diusulkan menyangkut pembangunan arsitektur data besar: pengumpulan dan ekstraksi data, pengayaan dan penyimpanan data, kurasi data, analisis data, dan visualisasi data.

Ada lima sublangkah dalam konstruksi arsitektur data: pengumpulan dan ekstraksi data, pengayaan dan penyimpanan data, kurasi data, analitik data, dan visualisasi data. Chen dkk., (2012) membandingkan sublangkah ini dengan Business Intelligence dan Analytics. Data berasal dari berbagai sumber yang heterogen dan dapat terstruktur atau tidak terstruktur. Alat yang biasa digunakan untuk ETL (*extraction, transformation, loading*/ekstraksi, transformasi, dan pemuatan) dalam manajemen data dan pergudangan tidak memuaskan dalam konteks ini. Oleh karena itu, diperlukan metode dan alat khusus.

Pengumpulan dan ekstraksi data dari *database* terstruktur memerlukan alat khusus, seperti kueri data (permintaan SQL) atau pemrosesan analitik online (OLAP). Sublangkah ini lebih rumit untuk data tidak terstruktur dari web. Perlu mengekstrak berbagai halaman web yang berisi data yang menarik. Metadata yang terkait dengan halaman web ini dapat digunakan untuk klasifikasinya dan untuk menyediakan akses ke kontennya. Misalnya, definisi format MARC pada metadata sumber daya dokumenter yang dinormalisasi pada awal 1960-an. Berkat pengembangan Web Tertaut termasuk RDF (Resource Description Framework, standar dari W3C) khususnya, dimungkinkan untuk menggunakan SPARQL untuk meminta RDF. Proses ekstraksi menghasilkan tabel terstruktur dan berbeda sesuai dengan format halaman web: API, HTML, atau pdf. Ekstraksi mungkin otomatis, semi-otomatis atau manual. Data dapat diekstraksi secara otomatis dari halaman web dengan format API. Namun, ekstraksi data yang relevan dari artikel ilmiah memerlukan panduan bacaan, yang dihasilkan dari analisis ahli ontologi dan praperlakuan. Jenis ekstraksi ini, dengan demikian, semi otomatis. Dalam sub-langkah pengayaan dan penyimpanan data, data yang diekstraksi disimpan dalam sistem manajemen basis data relasional (DBMS). Enrichment adalah proses menambahkan data ke DBMS. Data ini berasal dari

para ahli atau model. Model adalah simulasi numerik empiris dari jenis operasi unit, termodinamika dan energi untuk kontrol aliran, transformasi dan transfer.

Sublangkah kurasi data melibatkan pembersihan, penambahan dan penghapusan data untuk pengelolaan volume dan nilai. Setelah kurasi ini, *database* kedua yang lebih akurat dan dapat diakses dapat dibuat. Kurasi menghemat waktu dalam sublangkah berikutnya dan mencegah interpretasi yang salah selama sublangkah analisis data dan langkah analisis keberlanjutan. Sublangkah analisis data bergantung pada tujuan, domain data, dan pembuat keputusan. Untuk jenis analisis yang memungkinkan: analisis deskriptif (apa yang terjadi?), analisis diagnostik (mengapa itu terjadi?), analisis prediktif (apa yang akan terjadi?) dan analisis preskriptif (bagaimana kita bisa mewujudkannya?). Analisis deskriptif dan diagnostik menggunakan sejumlah metode dan algoritma yang berbeda, seperti summarisation, standar deviasi, ketergantungan linier atau nonlinier, analisis faktor dan metode klasifikasi (induksi pohon keputusan, jaringan *Bayesian*, dan *k-nearest neighbor classifier*). Beberapa metode ini bersifat visual, dan oleh karena itu visualisasi data dapat disertakan dalam sub-langkah analisis data. Visualisasi data juga dapat dicapai dengan mengeplot data mentah sebagai grafik sederhana atau interaktif.

Pada langkah pertama, yaitu tujuan, batasan sistem harus didefinisikan dengan jelas, dan pemikiran siklus hidup (LCT) direkomendasikan untuk tujuan ini. LCT mendorong pendekatan “*from cradle to grave*” atau “*from cradle to cradle*”. Dalam model CE, bagian dari siklus hidup di mana produk digunakan adalah elemen kunci untuk kemajuan menuju transisi ekologis. Pendekatan “*from cradle to gate*” sering lebih disukai karena integrasi elemen hilir ke dalam analisis keberlanjutan bisa jadi membosankan dan sulit. Secara khusus, para ilmuwan sering kali merasa tidak mungkin untuk mempertimbangkan perilaku pengguna akhir atau konsumen dalam model mereka. Batas-batas sistem memiliki pengaruh yang kuat pada penilaian yang dilakukan selanjutnya. Misalnya, harus ditentukan apakah rantai pasok biomassa hulu diperhitungkan. Setelah tujuan

dan ruang lingkup telah ditentukan, rantai pasok, teknologi, dan proses transformasi harus dijelaskan. Deskripsi ini harus selengkap mungkin dalam hal operasi proses, lokasi studi, berbagai *input* dan *output*, dan jenis energi yang digunakan. Rincian ini memastikan relevansi data yang dikumpulkan. Sub-langkah terakhir adalah memilih apakah akan mempelajari item ekonomi, sosial atau lingkungan. Studi dapat menangani satu, dua atau ketiga bidang ini. Untuk pengelolaan keberlanjutan yang lengkap, ketiga bidang tersebut harus dimasukkan, tetapi elemen sosial sering kali dihilangkan dari analisis karena keterbatasan metodologis dan masalah waktu serta biaya.

Pada langkah kedua, Arsitektur Data, lima sublangkah pada Gambar 6.7 serupa dengan langkah-langkah umum dalam analisis *big data*. Data yang akan digunakan harus dipilih terlebih dahulu. Ini memerlukan beberapa pertanyaan untuk dijawab: Di mana saya menemukan data? Apa jenis datanya? Apa ketidakpastian pada data? Data apa yang sudah saya miliki? Tingkat otomatisasi data apa yang saya butuhkan? Daftar data yang berbeda pada Gambar 6.6 tidak lengkap, dan jenis data lain dapat ditambahkan, tergantung pada tujuan proyek. Pada langkah ini, metode KE dapat berguna untuk mengumpulkan data. Data dapat diekstraksi dengan berbagai cara (misalnya CSV, SQL, HTML, XML). Selain itu, integrasi *big data* ke dalam valorisasi rantai pasok pertanian tidak selalu melibatkan pemrosesan otomatis. Untuk basis semi-terstruktur, seperti basis data ilmiah, para ahli dari domain yang bersangkutan harus memilih dan memverifikasi data yang diekspor. Untuk basis terstruktur, seperti database LCA, data secara otomatis diekspor ke sistem pendukung keputusan. Sublangkah pengayaan dan penyimpanan data berbeda antara studi dengan kompleksitas atau dengan tingkat otomatisasi. Kurasi data melibatkan pembersihan data, penambahan data ahli dan penghapusan data abnormal. Terakhir, analisis data dan visualisasi data bergantung pada tujuan, data, dan pembuat keputusan.

Langkah ketiga, analisis keberlanjutan, melibatkan pemilihan metode dampak, indikator dan metode penyebaran sesuai dengan setiap bidang pengelolaan keberlanjutan. Pilihan ini didasarkan pada

dua langkah sebelumnya. Pertanyaan yang paling penting adalah apakah metode yang digunakan sudah sesuai dengan batasan dan data yang dipilih. Pemilihan metode tergantung pada lokasi di mana penelitian berlangsung, jenis data dan batas-batas penelitian. Penting untuk memeriksa bahwa semua hipotesis dari setiap metode terpenuhi sebelum menerapkan metode tersebut. Setiap metode termasuk dalam kategori tertentu dan memiliki keterbatasannya sendiri. Metode ini dapat didasarkan pada satu kriteria (penilaian karbon) atau multi-kriteria (LCA), kualitatif atau kuantitatif, berorientasi pada “produk” atau berorientasi pada “organisasi”.

Visualisasi keberlanjutan adalah langkah keempat. Berbagai jenis visualisasi dapat digunakan, tergantung pada proses pengambilan keputusan berbasis kelompok, tujuan studi atau pilihan metode analisis, tetapi visualisasi ini tidak boleh diabaikan. Langkah terakhir adalah Keputusan. Langkah ini memandu pengambilan keputusan berbasis kelompok untuk pemilihan biomassa, rantai pasok pertanian (operasi transformasi dan proses hulu/hilir) dan teknologi. Keputusan dapat diambil secara manual atau dengan bantuan alat pendukung keputusan, seperti ELECTRE, atau PROMETHEE. Metode pengambilan keputusan berbasis kelompok campuran, seperti Delphi-SWOT (akan diimplementasikan dalam pengembangan pendekatan ini di masa mendatang. Pendekatan tersebut diilustrasikan dengan studi kasus di bagian berikutnya: analisis empat rantai pasok pertanian di area lingkungan yang berkaitan dengan proses valorisasi jerami padi di Prancis.

2. Studi Kasus Valorisasi Rantai Pasokan Jerami Padi

a. Praperlakuan Biomassa Lignoselulosa

Belaud dkk. (2019) melakukan studi kasus valorisasi rantai pasok jerami padi. Biomassa lignoselulosa memiliki empat komponen utama: selulosa, hemiselulosa, lignin, dan asam fenolik. Selulosa dan hemiselulosa dapat dihidrolisis untuk menghasilkan glukosa. Lignin

dan asam fenolik bertanggung jawab atas rekalsitran bahan selulosa, kristalinitas selulosa dan karakteristik permukaan dan porositas tertentu dari polimer matriks. Oleh karena itu, praperlakuan biomassa sangat penting, untuk mengurangi kristalinitas, untuk meningkatkan luas permukaan spesifik dan porositas serta untuk mengekstrak konstituen utama. Berbagai metode pra-perlakuan telah dipelajari secara rinci selama tiga puluh tahun terakhir. Masing-masing metode pra-perlakuan ini, baik mekanik, fisika, kimia, fisikokimia, biologi atau campuran dari berbagai jenis, memiliki kelebihan dan kekurangan. Berbagai faktor telah digunakan untuk membandingkan kinerja, efisiensi atau dampak lingkungan dari proses praperlakuan ini: faktor lingkungan, konsumsi energi dan efisiensi energi.

Tujuan dari studi kasus ini adalah untuk menggunakan pendekatan yang dijelaskan di atas dan alur kerja terkait untuk membantu peneliti memilih proses yang berkelanjutan untuk valorisasi pra-perlakuan jerami padi. Hasil awal yang diperoleh disajikan di sini. Metode LCA diterapkan pada domain lingkungan untuk analisis keberlanjutan. Studi masa depan akan fokus pada bidang ekonomi, dan akan menggunakan metode *life cycle costing* (LCC). Batas sistem ditetapkan pada tahap prapenggilingan dan hidrolisis enzimatis. Pengangkutan biomassa dari lahan ke perusahaan juga diperhitungkan. Hipotesis intinya adalah: (1) proses pra-percontohan dipelajari; (2) jerami padi dianggap sebagai limbah pertanian bebas tanpa dampak lingkungan—semua dampak tanaman padi dikaitkan dengan bagian yang digunakan untuk makanan; (3) energinya adalah listrik campuran Prancis; dan (4) lokasi penelitian adalah Prancis, lahan dan perusahaan diketahui terpisah jauh. Unit fungsional yang dipilih adalah “produksi 1 gram glukosa”. Hasil glukosa diperlukan untuk ekspresi aliran per unit fungsional. Empat proses yang berbeda untuk perlakuan jerami padi dipelajari.

- a) RSP1 (proses jerami padi 1), dengan satu operasi: pra-penggilingan.

- b) RSP2, dengan dua operasi penggilingan: pra-penggilingan + penggilingan sangat halus. Seperti RSP1 sebelumnya, ini adalah proses mekanis.
- c) RSP3, dengan tiga operasi: pra-penggilingan + perlakuan fisikokimia + pengepresan dan pemisahan.
- d) RSP4, dengan empat operasi berurutan: pra-penggilingan + perlakuan fisikokimia + pengepresan dan pemisahan + penggilingan sangat halus.

Langkah terakhir dari proses transformasi adalah perlakuan hidrolisis enzimatis, yang sama untuk keempat sistem yang dipelajari. Satu-satunya data dari hidrolisis ini yang digunakan adalah hasil glukosa dan jumlah *buffer*, yang tergantung pada kualitas biomassa (lebih banyak *buffer* diperlukan untuk kualitas biomassa yang lebih rendah).

b. Hasil

Pada langkah arsitektur data, data dari berbagai sumber *big data* dikumpulkan dan diekstraksi untuk melengkapi penilaian dan untuk membuat pendukung keputusan bagi peneliti: web publik, data lapangan, data perusahaan, basis data LCA dan basis data ilmiah. Basis data ilmiah termasuk artikel yang diterbitkan pada empat proses jerami padi. Lima belas artikel dipilih oleh para ahli teknik industri biomassa. Basis data LCA yang digunakan adalah Ecoinvent, yang berisi data latar belakang dan informasi tentang ketidakpastian pada data tersebut. Basis data lapangan berisi semua data aliran, baik untuk input maupun output, untuk pengoperasian proses, bersama dengan informasi tentang teknologi yang digunakan untuk operasi individu. Data diekstraksi dari database ini dalam bentuk file CSV. File CSV ini kemudian digunakan untuk sublangkah kedua pengayaan dan penyimpanan semua data, sesuai dengan penambahan data. Operasi unit penggilingan diidentifikasi untuk setiap artikel, tetapi data energinya hilang sehingga menghambat analisis keberlanjutan (langkah ketiga).

Model empiris internal yang dibuat oleh para ahli praperlakuan jerami padi tersedia dan digunakan untuk memperkaya data.

Sublangkah ketiga, kurasi data, dilakukan secara manual oleh para ahli teknik berkelanjutan. Dua kurasi dilakukan dengan lima belas artikel jerami padi. Keseimbangan material tidak diperiksa dalam dua dari lima belas artikel yang dipilih karena kurangnya informasi. Oleh karena itu, semua data dari dua artikel ini dihapus. Ketersediaan data energi untuk unit operasi juga sangat tambal sulam. Oleh karena itu, diputuskan untuk menghapus data energi yang disajikan di beberapa artikel, untuk memungkinkan peningkatan semua artikel dan menghindari bias. Peningkatan ini memungkinkan untuk membandingkan jalur industri yang berbeda untuk langkah selanjutnya (analisis keberlanjutan, visualisasi dan keputusan keberlanjutan).

Setelah kurasi ini, sublangkah keempat adalah analisis data. tiga belas artikel menjelaskan 39 eksperimen. Belaud dkk. (2019) memutuskan untuk membuat satu eksperimen dari setiap artikel untuk memfasilitasi perhitungan, analisis, visualisasi, dan pengambilan keputusan selanjutnya. Eksperimen ini merupakan “percobaan rata-rata” dari setiap artikel, dengan menghitung nilai rata-rata untuk semua data di setiap artikel. Nilai rata-rata ini kemudian diekspresikan per unit fungsional, untuk memastikan konsistensi data. tiga belas “percobaan rata-rata” ini dikelompokkan bersama menjadi empat jenis proses: RSP1, RSP2, RSP3 dan RSP4. Sublangkah visualisasi data menghasilkan tabel inventaris yang digunakan untuk langkah berikutnya. Pada akhir langkah arsitektur data, inventaris siklus hidup untuk setiap proses (RSP1, RSP2, RSP3 dan RSP4) dihasilkan.

Langkah ketiga, analisis keberlanjutan, menggunakan metode ReCiPe 2016 untuk menilai dampak lingkungan dan metode Monte-Carlo untuk menghitung dispersi. Basis data faktor dampak ReCiPe (RIVM, 2018) dan metode Monte-Carlo tersedia dari web publik. Database LCA yang digunakan adalah Ecoinvent (*EcoInvent Life Cycle Inventory Database*, 2017). Matriks silsilah diperoleh dari artikel ilmiah dan dilengkapi untuk data latar belakang di Ecoinvent. Belaud dkk. (2019) memilih untuk menggunakan metode LCA dan standar

ISO terkait. Data untuk sistem latar depan, yang dihasilkan dari langkah kedua, dan data latar belakang, yang diambil dari Ecoinvent, dicampur untuk menghitung dampak lingkungan dari setiap input dan output. Metode ReCiPe kemudian digunakan untuk menghitung 18 indikator titik tengah dan tiga indikator titik akhir.

Langkah keempat, visualisasi keberlanjutan, memberikan visualisasi indikator lingkungan. Visualisasi interaktif ini mendukung pengambilan keputusan untuk langkah terakhir mengenai proses pra-perlakuan “terbaik” untuk penilaian jerami padi. Metode titik akhir menggunakan tiga indikator: kesehatan manusia, ekosistem, dan sumber daya. Hasil dinyatakan per unit fungsional sehingga memungkinkan untuk membandingkan proses yang berbeda. RSP1 dan RSP3 memiliki dampak terbesar pada ketiga indikator yang dipertimbangkan. Dampak ini dapat dijelaskan dengan operasi pra-penggilingan untuk RSP1. Produksi satu gram glukosa dengan perlakuan awal ini membutuhkan sejumlah besar biomassa dan banyak buffer untuk hidrolisis enzimatis. Penggunaan buffer dalam jumlah besar memiliki dampak yang sangat tinggi. Di RSP3, operasi pengepresan dan pemisahan memiliki dampak tertinggi. Dengan demikian, dua proses yang sangat berbeda ditemukan memiliki indikator titik akhir yang tinggi. Dengan visualisasi ini, tidak mudah untuk mengidentifikasi proses dengan dampak lingkungan yang paling kecil karena perbedaan antara RSP2 dan RSP4 kecil.

Visualisasi indikator titik tengah bisa lebih relevan untuk pengambilan keputusan. RSP2 memiliki dampak yang lebih rendah daripada RSP4 untuk semua kecuali tiga indikator: eutrofikasi laut, ekotoksitas terestrial, dan pendudukan lahan pertanian. Pada titik ini, kelompok pembuat keputusan, dapat membuat keputusan secara langsung atau merujuk pada studi tambahan yang membandingkan RSP2 dan RSP4. Namun, rantai *biorefinery* inovatif dan hanya sedikit data yang berkaitan dengan *biorefinery* yang telah dipublikasikan hingga saat ini. Oleh karena itu, studi lebih lanjut diperlukan.

Tim ilmuwan data dan peneliti di bidang teknik industri dan keberlanjutan menerapkan lima langkah untuk menguji pendekatan

tersebut. Hasil diperoleh dengan alat penelitian yang baru dibuat yang menggabungkan aplikasi LCA yang terkenal (Simapro[®]) dan aplikasi Microsoft Excel-VBA. Alat ini mendukung semua langkah pendekatan yang diusulkan kecuali langkah keputusan. Pendekatan ini dapat ditingkatkan untuk studi kasus yang disajikan. Setiap artikel baru tentang pra-perlakuan jerami padi akan memberikan data proses tambahan sehingga meningkatkan analisis keberlanjutan. Model termodinamika kemudian diperlukan untuk melengkapi data dari publikasi ilmiah, terutama untuk perhitungan konsumsi energi untuk proses operasi. Studi kasus juga dapat diperluas dengan memasukkan bidang ekonomi dalam pengembangan perangkat penelitian ini di masa mendatang.

Pendekatan yang mengintegrasikan Industri 4.0 ke dalam desain rantai pasok untuk meningkatkan manajemen keberlanjutan valorisasi limbah pertanian telah dirancang. Pendekatan lima langkah ini menggabungkan metode dan alat dari *big data* dan penilaian keberlanjutan. Berdasarkan arsitektur *big data*, lima sublangkah dari langkah arsitektur data telah ditentukan: ekstraksi data, penyimpanan, kurasi, analisis, dan visualisasi. Kelima sublangkah ini menyediakan semua data yang diperlukan untuk langkah berikutnya: analisis keberlanjutan. Langkah visualisasi keberlanjutan kemudian dapat menghasilkan hasil melalui berbagai teknik visualisasi yang dinamis dan mendalam. Akhirnya, langkah keputusan melibatkan proses pengambilan keputusan berbasis kelompok atau metode keputusan semiotomatis. Tiga bidang keberlanjutan—ekonomi, lingkungan dan sosial—dapat dinilai. Dalam studi kasus yang disajikan, Belaud dkk. (2019) menerapkan pendekatan ini pada penilaian empat proses perlakuan awal dalam industri pertanian pangan. Pendekatan ini mengesampingkan dua proses karena memiliki dampak lingkungan yang terlalu besar. Studi tambahan akan diperlukan untuk memungkinkan kelompok keputusan untuk mengidentifikasi yang “terbaik” dari proses yang tersisa.

Berbagai kemungkinan untuk meningkatkan pendekatan dan studi kasus ini dapat dijajaki: (1) penambahan sumber data,

metode dan visualisasi khusus untuk wilayah ekonomi dan sosial, untuk meningkatkan inventarisasi data keberlanjutan dan metode penilaian; (2) kemajuan menuju otomatisasi ekstraksi data yang akan bermanfaat dalam menghemat waktu dan menambah sumber data baru dengan lebih mudah; (3) dari umpan balik dengan alat penelitian Excel-VBA, pengembangan kerangka kerja komputasi ergonomis lengkap yang mendukung pendekatan ini. Hal ini akan mendorong pemangku kepentingan untuk mengadopsi pendekatan ini dan akan memfasilitasi pengambilan keputusan melalui penerapan teknik pengambilan keputusan kolaboratif, seperti Delphi-SWOT; (4) desain model untuk menghitung energi; (5) generalisasi prinsip ini dan pengembangan perpustakaan model bisnis dan domain spesifik dari rekayasa proses pertanian pangan. Model-model ini dapat digunakan untuk memeriksa dan memvalidasi data dalam langkah arsitektur data. Kontrol dapat mencakup material lanjutan atau analisis energi; dan (6) pengembangan propagasi dispersi data dan sistem penjelasan kualitatif otomatis bagi pemangku kepentingan. Kemajuan ini akan membantu menyempurnakan metode, menjadikannya lebih umum dan lebih akurat.

Aplikasi *big data* dalam aspek rantai pasok pangan mulai dari informasi pangan, solusi *big data* bagi masalah pergudangan serta integrasi *big data* dengan rantai pasok pangan telah kita bahas di bab ini. Bab selanjutnya akan menjelaskan kecerdasan buatan/*artificial intelligence* (AI) dalam rantai pasok dan sistem pangan. Sebagai catatan penting, kita juga bisa melihat bahwa *big data* juga bisa digabungkan dengan kecerdasan buatan. Sederhananya, karena *big data* dan AI saling melengkapi. AI menjadi lebih baik ketika semakin banyak data yang diberikan. Kondisi ini membantu organisasi memahami konsumen mereka jauh lebih baik, bahkan dengan cara yang tidak mungkin dilakukan di masa lalu. Di sisi lain, *big data* tidak berguna tanpa perangkat lunak untuk menganalisisnya. Bahkan manusia tidak dapat melakukannya secara efisien.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB 7

Kecerdasan Buatan dalam Rantai Pasok dan Sistem Pangan

A. Kecerdasan Buatan dalam Sistem Pangan

Kecerdasan buatan atau *artificial intelligence* (AI) bukanlah bidang baru. Dimulai pada 1950-an, harapan untuk menjadi *game-changer* bagi umat manusia sangat tinggi. Eksperimen robotik pertama mengarah pada banyak literatur fiksi ilmiah yang muncul sekitar waktu itu. Beralih ke akhir tahun 90-an, AI telah muncul dalam bentuk yang berbeda, tidak begitu megah tetapi jauh lebih kuat berkat perkembangan pesat dalam bidang komputasi yang berfokus pada aplikasi perangkat lunak daripada robotika semata. AI sedang diterapkan dan diujicobakan di banyak industri dan memiliki potensi untuk mengubah sistem pangan menuju praktik yang lebih berkelanjutan.

Definisi kecerdasan buatan dari *Encyclopaedia Britannica* menyatakan, “kemampuan komputer digital atau robot yang dikendalikan komputer untuk melakukan tugas-tugas yang umumnya terkait dengan makhluk cerdas”. Untuk memahami apa itu kecerdasan buatan, kita bisa menghubungkannya dengan manusia dan bagaimana

fungsinya. Misalnya, manusia dapat berbicara dan mendengarkan (bidang pengenalan suara), menulis dan membaca dalam satu atau beberapa bahasa (bidang pemrosesan bahasa alami), melihat dan menganalisis apa yang dilihat (bidang penglihatan dan pemrosesan gambar), serta bergerak dan berinteraksi dengan lingkungan dan dapat mengidentifikasi pola (bidang pengenalan pola). Hal ini meluas ke proses manusia yang lebih kompleks dalam pembelajaran mesin (*supervised, unsupervised, deep*) dan bidang jaringan saraf.

Sementara itu, sistem pangan mencakup seluruh pelaku dan aktivitas yang menghasilkan nilai tambah dan saling terkait mulai dari tahap produksi, agregasi, pengolahan, distribusi, konsumsi, dan pembuangan produk pangan yang berasal dari pertanian, kehutanan atau perikanan, dan bagian dari ekonomi, sosial, serta lingkungan alam tempat mereka hidup. Sistem pangan terdiri dari subsistem (misalnya sistem pertanian, sistem pengelolaan limbah, dan sistem pasokan *input*) dan berinteraksi dengan sistem kunci lainnya (misalnya sistem energi, sistem perdagangan, dan sistem kesehatan). Oleh karena itu, perubahan struktural dalam sistem pangan juga bisa berasal dari perubahan sistem lain; misalnya, kebijakan yang mempromosikan lebih banyak penggunaan bahan bakar nabati dan dalam sistem energi akan berdampak signifikan pada sistem pangan (FAO, 2018).

Beralih ke sistem pangan berkelanjutan (*sustainable food system* atau SFS), kita bisa memahami SFS sebagai sistem pangan yang memberikan ketahanan pangan dan gizi untuk semua orang sedemikian rupa sehingga basis ekonomi, sosial, dan lingkungan untuk menghasilkan ketahanan pangan dan gizi generasi mendatang tidak terganggu. Hal ini berarti bahwa sistem pangan ini menguntungkan bagi seluruh pihak (keberlanjutan ekonomi), memiliki manfaat yang luas bagi masyarakat (keberlanjutan sosial), dan memiliki dampak positif atau minimal tidak merusak lingkungan alam (keberlanjutan lingkungan alam). Sistem pangan berkelanjutan merupakan inti dari Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB) atau *Sustainable Development Goals* (SDGs) PBB. Diadopsi pada tahun 2015, SDGs menyerukan transformasi besar dalam pertanian dan sistem pangan

untuk mengakhiri kelaparan, mencapai ketahanan pangan, dan meningkatkan gizi pada tahun 2030. Untuk mewujudkan SDGs, sistem pangan global perlu dibentuk kembali menjadi lebih produktif, lebih inklusif pada masyarakat miskin dan terpinggirkan, berkelanjutan dan tangguh terhadap lingkungan, serta mampu memberikan pangan yang sehat dan bergizi untuk semua. Ini adalah tantangan kompleks dan sistemik yang memerlukan kombinasi tindakan yang saling terkait di tingkat lokal, nasional, regional, dan global (FAO, 2018).

Sistem pangan merupakan jaringan berbagai variabel yang saling berhubungan melalui hubungan sebab akibat. Keberlanjutan adalah properti dari sistem itu yang dapat dinilai dengan menggunakan pendekatan pemikiran sistem untuk memahami dinamikanya. Hasil, kegiatan inti, umpan balik, dan pertukaran adalah pembahasan utama yang diperlukan untuk mendukung transisi ke sistem pangan berkelanjutan yang akan dibahas dalam bab ini. Saat ini, ada dua rezim pangan yang cenderung menawarkan solusi berbeda untuk keberlanjutan keseluruhan sistem pangan: rezim pangan lingkungan perusahaan (yang audit, kontrak, dan merek memaksakan kontrol ekologis) dan sistem pangan pertanian yang diorganisasi secara regional dan tangguh secara ekologis (bersarang ke dalam sistem global yang mampu memantau berbagai dimensi ekologis). Keduanya merupakan proposisi solusi yang dipertimbangkan saat menganalisis konteks keberlanjutan.

Konferensi Rio pada tahun 1992, Protokol Kyoto pada tahun 1997, dan Perjanjian Paris pada tahun 2016 merupakan tonggak penting menuju pembentukan kerangka kerja global untuk pembangunan berkelanjutan (PB), mitigasi, dan adaptasi perubahan iklim. Di antara berbagai tantangan yang dihadapi umat manusia di tahun-tahun mendatang, kemampuan untuk memberi makan 10 miliar orang pada tahun 2050 di dunia ketika perubahan iklim, penipisan sumber daya, dan polusi merupakan tantangan serius. Majelis Umum PBB (2015) memilih resolusi yang berisi 17 tujuan dan 169 target untuk mencapai “Masa Depan yang Kita Inginkan”. Pangan adalah inti dari beberapa Tujuan Pembangunan Berkelanjutan atau *Sustainable Development*

Goals (SDGs) PBB dengan 10 dari 17 yang berhubungan langsung atau tidak langsung dengan pangan, bagaimana atau di mana produksi pangan, dan bagaimana pangan dikonsumsi.

Sistem pangan dan pelakunya merupakan pendorong utama perubahan iklim, bertanggung jawab atas perubahan penggunaan lahan, penipisan sumber daya air tawar, serta pencemaran ekosistem perairan dan darat melalui input nitrogen dan fosfor yang berlebihan. Tekanan ini, terutama disebabkan oleh praktik pertanian seperti pembukaan lahan, penggunaan pupuk sintetis secara intensif, dan emisi dari peternakan, juga meningkat melalui aktivitas penyimpanan, pengangkutan, dan pemrosesan dalam rantai pasok pangan. Pada gilirannya, emisi gas rumah kaca yang dihasilkan sepanjang siklus hidup produksi dan konsumsi pangan memberikan tekanan lingkungan yang semakin besar pada sistem pangan. Jejak global dari emisi pangan semakin diperburuk oleh dampak limbah pangan di tingkat ritel dan konsumen. Menurut Flanagan dkk. (2018), jika limbah pangan adalah sebuah negara, akan menjadi penghasil gas rumah kaca terbesar ketiga di dunia.

Westernisasi pola makan dan pertumbuhan populasi bisa menyebabkan tekanan lingkungan pada sistem pangan meningkat 50–90% pada tahun 2050 dengan konsekuensi yang menghancurkan bagi ketahanan pangan dan gizi di seluruh dunia. Dalam lingkungan yang berubah ini, cara sistem pangan berfungsi akan membutuhkan solusi multilevel mengingat kerumitan kegiatan yang terkait bersama: operasi pertanian, perikanan, hingga pascapanen, pemrosesan, distribusi, ritel, dan konsumsi (FAO, 2018a).

Perancang inovasi dan transisi sistem memiliki peran penting dalam merancang sistem pangan berkelanjutan di masa depan. Praktik ini dibangun di atas strategi Desain untuk Lingkungan dan Desain untuk Keberlanjutan yang dikembangkan dengan baik selama beberapa dekade. Bersama dengan pendekatan Sistem Layanan Produk dan Desain untuk Inovasi Sosial, Desain Strategis (Ceschin & Gaziulusoy, 2016) dan Desain Transisi (Tonkinwise, 2015) bertujuan untuk mengubah sistem sosio-teknis.

Dengan tujuan untuk mendamaikan nilai-nilai ekologi, sosial, dan ekonomi serta memajukan kesejahteraan masyarakat, jalur transisi yang dipandu oleh desain menuju ketahanan pangan dan gizi mencakup (1) menghubungkan kembali sistem pangan untuk mendorong sinergi perkotaan-perdesaan, (2) memikirkan kembali ketahanan pembangunan, (3) menghubungkan kembali keberlanjutan dan kesehatan sambil (4) memperkuat hak pangan kelompok rentan tradisional, dan (5) menyeimbangkan kembali rekayasa sosial serta teknis.

Perancang transisi mencari kemungkinan yang muncul dan mengembangkan visi jangka panjang tentang masa depan yang berkelanjutan. Visi masa depan yang dirancang dapat mengidentifikasi teknologi disruptif untuk mengembangkan target keberlanjutan. Teknologi disruptif utama yang dapat mengubah sistem pangan adalah kecerdasan buatan yang menjadi fokus bab ini.

Lalu bagaimana kecerdasan buatan berkaitan dengan sistem pangan berkelanjutan?

Kecerdasan buatan diterapkan melalui pengelolaan kesehatan tanaman (visi komputer, pembelajaran mesin, pengenalan pola, dan robotika), otomatisasi operasi pertanian (robotik), dan pengembangan rantai pasok yang digerakkan oleh permintaan (pengenalan pola, klasifikasi dan prediksi, serta pembelajaran mesin). Kecerdasan buatan juga diterapkan melalui aplikasi *Augmented Personalised Health* (Sheth dkk., 2018) yang pada gilirannya dapat memandu asupan pangan dan nutrisi manusia dengan lebih baik untuk hasil yang lebih sehat. Kecerdasan buatan berpotensi mengubah sistem pangan dan mendukung transisi ke dampak lingkungan yang lebih rendah serta ketahanan dan kesehatan yang lebih tinggi.

Kecerdasan buatan dapat memberikan hasil yang positif. Di bidang pertanian dan produksi pangan, sebuah laporan oleh GeSI (2015) mengidentifikasi potensi efek yang memungkinkan dari teknologi berkemampuan kecerdasan buatan yang dapat melihat manfaat lingkungan, seperti peningkatan 30% dalam hasil panen, pengurangan lebih dari 300 miliar liter konsumsi air dan pengurangan

penggunaan minyak sebesar 25 juta barel per tahun pada tahun 2030. Hasil ini termasuk jejak karbon penggunaan teknologi informasi dan komunikasi (TIK) yang diperkirakan 10 kali lebih rendah dari emisi yang dihindari.

Namun, teknologi kecerdasan buatan memicu pertanyaan tentang pertukaran dan dampak pada dimensi etika, keadilan, akses, dan transparansi. Teknologi kecerdasan buatan yang tidak merata, terutama tersedia di negara maju. Manfaat yang berkaitan dengan pertanian karena itu lebih terfokus pada produsen yang lebih besar daripada petani kecil yang berpotensi mengakibatkan peningkatan kesenjangan antara keduanya, antarnegara dan di dalam negara. Pelatihan model kecerdasan buatan juga menghasilkan sejumlah besar gas rumah kaca dan ini diperkirakan akan meningkat secara dramatis pada tahun 2030. Manfaat apa pun yang didapat melalui kecerdasan buatan perlu dipertimbangkan terhadap potensi kelemahan yang ditimbulkannya.

1. Pendekatan Aspiratif untuk Keberlanjutan

Konteks keberlanjutan sering kali bertentangan dengan pendekatan *triple bottom line* (ekologis, ekonomi, dan sosial) (Gardas dkk., 2019). Penulis mengutip tujuan pembangunan berkelanjutan PBB sebagai kerangka keberlanjutan penelitian mereka. Istilah “keberlanjutan” sebagian besar disebutkan dalam pengertian umum dengan beberapa artikel yang merujuk secara khusus pada efisiensi lingkungan, perilaku berkelanjutan, atau pengurangan limbah.

Berkenaan dengan industri, hasilnya lebih fokus pada produksi pangan dan sistem pertanian, tetapi tetap umum dalam pendekatannya. Mereka tidak melaporkan dari sudut pandang komoditas tanaman atau industri tertentu, tetapi lebih pada produksi pangan atau pertanian sebagai ladang. Alat bertenaga AI mendukung dorongan menuju peningkatan produktivitas dan pertanian presisi atau memungkinkan sektor pertanian menyesuaikan produksi dengan perubahan iklim dan pola makan (Gardas dkk., 2019). Alat-alat ini disajikan seperlunya untuk transisi menuju sistem pangan yang lebih

berkelanjutan. Pant (2016), khususnya, menyarankan otomatisasi dan pembelajaran mesin akan memberdayakan proses pengambilan keputusan petani dan menciptakan sistem lumbung yang cerdas, mengotomatisasi pengolahan tanah, pembibitan, panen, hasil panen, irigasi, kesehatan tanaman, dan kondisi tanah.

Beberapa bab buku dan artikel menawarkan perspektif lensa “masa depan” yang mengidentifikasi tren pertanian dan produksi pangan. Mereka menampilkan tantangan keberlanjutan yang penulis diskusikan akan diselesaikan oleh AI. Visi masa depan mengungkapkan dunia ketika robot dan mesin akan menjadi pembuat pangan dalam makanan cepat saji, kendaraan *self-driving* akan mengirimkan bahan pangan, dan otomatisasi akan memungkinkan penyesuaian di restoran dan saluran bahan pangan (Roos, 2017). Transformasi mendalam tenaga kerja terkait pangan kemungkinan akan membawa dampak baik negatif maupun positif bagi masyarakat.

Keberlanjutan sering disajikan sebagai masalah yang harus dipecahkan dengan teknologi pada umumnya dan oleh TIK pada khususnya. Akibatnya, pendekatan berikut lebih menonjol dalam literatur: desain rekayasa hijau dan *Internet of Things* (IoT) untuk melacak, memantau, memodelkan, dan melaporkan atau kemampuan untuk menggunakan AI dalam menganalisis sistem yang kompleks dan mendukung proses pengambilan keputusan. Inisiatif keberlanjutan yang didukung oleh teknologi dianggap sebagai jalan ke depan untuk perubahan besar sistem sosial-ekonomi yang memengaruhi perilaku menuju bentuk-bentuk baru yang berkelanjutan.

2. Aplikasi AI dalam Sistem Pangan

Di sektor pertanian, produk cerdas dan desain sistem, bersama dengan komputasi pervasif (konsep yang melibatkan penyemat mikroprosesor ke dalam objek sehari-hari), dapat membantu mengelola dampak perusahaan skala besar. Teknologi dapat mendukung peningkatan produktivitas di lahan pertanian. AI dan pembelajaran mesin khususnya dapat meningkatkan metode penambangan data, meningkatkan sistem pendukung keputusan, dan mengotomatisasi

atau mengoptimalkan produksi. Dalam pertanian organik, pembelajaran mesin digunakan untuk mendeteksi laju dekomposisi sayuran dan menginformasikan penggunaan pupuk hijau dalam pertanian organik. Sementara itu, di bidang perikanan, Sandåker (2018) meneliti penggunaan *machine vision* dan *machine learning* untuk mendeteksi parasit pada ikan. Di sisi lain, AI dan sensor akan mengelola rumah kaca dengan menawarkan pemantauan penyakit tanaman, robot pemanen, dan pemilahan hewan ternak secara otomatis.

Meningkatkan ketertelusuran dalam sistem pangan saat memindahkan produk pertanian dari petani ke konsumen akhir adalah salah satu tantangan yang dihadapi para pelaku rantai pasok bersamaan dengan transparansi dan keberlanjutan. Jejaring sosial, yang diberdasarkan oleh AI, dapat membawa keterlacakan, transparansi, dan keberlanjutan lebih dekat dengan permintaan konsumen dengan memberi mereka dukungan untuk sumber pangan lokal.

Di pabrik pengolahan, Herrero dkk. (2016) mengembangkan pengklasifikasi menggunakan jaringan saraf yang mendeteksi polutan lingkungan yang dapat digunakan untuk menilai kualitas pangan dan mendukung pemantauan lingkungan dalam rantai pasok pangan. Hal ini sejalan dengan prediksi transformasi industri yang lengkap seperti pemrosesan dan pengemasan pangan ketika teknologi yang didorong oleh permintaan dan adaptif akan memungkinkan produsen secara otomatis menyesuaikan jumlah bahan baku berdasarkan keinginan konsumen.

Teknik bertenaga AI mendukung perubahan perilaku di area sisa pangan atau konsumsi pangan. Mereka adalah bagian dari upaya untuk mencapai manfaat keberlanjutan seperti efisiensi energi atau pengurangan limbah. Bonaccorsi dkk. (2017) menggunakan algoritma pengenalan pangan untuk mengidentifikasi pangan yang disimpan dalam *freezer*, dan mengotomatiskan pembelajaran untuk manajemen pangan dan peralatan, yang pada akhirnya mengurangi konsumsi energi dan limbah pangan. Sementara itu, Ventå (2007) memberikan laporan ekstensif tentang keadaan kecerdasan mesin termasuk studi kasus tentang pengemasan cerdas yang dapat membantu memberikan

pemantauan dan kontrol otomatis pada produk yang dikirim sehingga mengurangi pemborosan pangan.

Kesehatan yang tepat dan kemampuan untuk menargetkan asupan nutrisi per orang diharapkan juga mengubah produksi pangan. Dengan alat bertenaga AI, belajar dari kebiasaan makan konsumen dapat mendorong rekomendasi tentang pilihan atau pasokan pangan yang lebih baik dan rekomendasi keamanan pangan. Bahkan pembuatan pangan bisa dipengaruhi oleh inovasi AI ketika pembuatan resep didukung oleh kreativitas komputasi AI.

Dalam studi kasus yang relevan dengan transportasi, Shu dkk. (2017) meninjau penggunaan AI untuk mengurangi konsumsi sumber daya selama fase penggunaan produk. Teknik dapat memberikan umpan balik kepada pengemudi truk bagi mereka untuk mengubah perilaku atau mengendalikan beberapa aspek mengemudi (misalnya otomatisasi).

Para peneliti (misalnya Gardas dkk., 2019) mengusulkan untuk memanfaatkan kekuatan pendekatan komputasi dalam memodelkan solusi untuk sistem pertanian pangan berkelanjutan yang secara *default* kompleks, multidisiplin dan multidimensi, area AI sangat cocok untuk ditangani. Temuan menunjukkan bahwa banyak penggunaan AI telah muncul dalam transisi ke sistem pangan berkelanjutan/*sustainable food system* (SFS). Namun, pertimbangan sebab akibat, dampak sistemik, dan peluang diperlukan untuk mencapai keberlanjutan.

3. Alat, Metode, dan Kerangka Kerja Penerapan AI di SFS: Tantangan dan Peluang

Literatur menyajikan berbagai pilihan yang mencakup teknologi bertenaga AI untuk transisi ke sistem pangan berkelanjutan. Ini mengungkapkan alat, metode, dan kerangka kerja yang diusulkan sebagai bagian dari penelitian ketika mengidentifikasi tantangan dan peluang menggunakan AI untuk keberlanjutan, atau transisi ke SFS atau keduanya. Hal ini memberi kita kesempatan untuk merenungkan apa yang harus dipertimbangkan ketika secara aktif mengejar agenda

ketika transisi masyarakat ke sistem berkelanjutan dapat dipimpin oleh desain dan mencakup dimensi AI.

Terlibat dengan tantangan yang ditimbulkan oleh ketahanan pangan, kesehatan, air, dan energi memerlukan pendekatan multidisiplin dan multistruktural. Transdisipliner sebagai kerangka metodologis melibatkan akademisi dan industri serta memandu penciptaan bersama metode ekoefisien untuk melampaui sistem sosio-teknis menuju desain dan inovasi transisi sistem. Pendekatan holistik ini menghasilkan solusi sistemik yang berasal dari pandangan bahwa pertanian tidak dilihat secara terpisah, tetapi sebagai bagian dari *input* dan *output* dalam seluruh siklus produksi dan konsumsi pangan. Oleh karena itu, perancang terlibat dengan dimensi lingkungan, sosial, dan keuangan dalam konteks ketika “teknologi, kesadaran, dan masyarakat terjalin dalam proses penciptaan relasional yang merupakan kunci evolusi manusia” menggunakan strategi desain yang berkelanjutan.

Peluang bagi perancang sistem, layanan, dan produk datang dengan tanggung jawab untuk menyeimbangkan teknologi dengan hak dan kesejahteraan manusia serta kepekaan ekologis yang diperlukan untuk pembangunan berkelanjutan. Desain layanan kolaboratif dan penciptaan kerangka normatif bersama adalah beberapa pendekatan yang berpusat pada manusia yang dapat mengatasi ketegangan sosio-teknis tersebut. Keseimbangan antara teknologi dan masyarakat kemudian diciptakan bersama dengan semua pelaku rantai pangan termasuk warga negara yang berperan sebagai subjek kreatif dan berdaya. Teknologi dan manusia dapat dipandang dalam suatu “sistem hubungan” (manusia-manusia, manusia-teknologi, teknologi-teknologi). Dengan tujuan untuk mencapai tujuan yang berkelanjutan, hubungan ini dapat dimodelkan menggunakan jaringan kolaboratif berbasis teknologi sebagai pendekatan yang dapat melawan teknologi nonmanusia untuk bersama-sama menciptakan komunitas kolaboratif.

Peluang lain adalah untuk mengaitkan transisi tingkat sistem dalam layanan material dan prototipe produk yang dapat dialami dalam konteks hubungan manusia-mesin dan membentuk kem-

bali serta mendefinisikan ulang interaksi antara keduanya. Artefak teknologi juga dapat terhubung erat dengan pengguna melalui perspektif relasional. Oleh karena itu, perancang perlu berpikir di luar perangkat dan desain untuk sistem hal-hal cerdas yang dimodelkan pada perilaku dan konteks. Dalam pandangan sistemik ini, teknologi “seperti yang digunakan” penting, bukan hanya “seperti yang dirancang”. Misalnya, ketika merancang solusi untuk mengurangi dampak lingkungan dari penggunaan produk menggunakan teknik AI, perancang harus memilih antara strategi: menyediakan solusi teknologi yang dapat meyakinkan pengguna untuk mengadopsi perilaku yang diinginkan atau teknologi yang melakukan perilaku yang diinginkan bagi orang-orang. Oleh karena itu, muncul pertanyaan etis tentang niat perancang.

Namun, AI mengubah perancang konteks yang beroperasi di dalamnya. Oleh karena itu, proses intervensi transisi dibingkai untuk memfasilitasi perubahan sosial yang lebih luas. Komunitas *online* yang didukung AI sangat tersegmentasi dan terorganisasi sendiri. Mereka beroperasi dalam “gelembungnya” dengan cara yang akan berdampak pada sistem, tetapi akan mempersulit untuk memprediksi dan memodelkan manfaat keseluruhan sistem. Jenis kesukuan ini harus dipertimbangkan oleh perancang untuk peluang yang dibawanya demi inovasi dan disrupsi, pun begitu kemungkinan yang ditawarkannya untuk “membangkitkan ulang” perubahan sosial yang lebih luas yang diperlukan untuk transisi ke SFS.

AI juga mengubah metode penelitian sistem pangan. Misalnya, jaringan Bayesian yang dipelajari mesin bekerja dengan set data terbuka dan menganalisis limbah pangan yang dilaporkan di Eropa. Hasilnya adalah ditemukan perbedaan dengan metode analisis tradisional (Grainger dkk., 2018). Algoritma memungkinkan penulis untuk mendeteksi interaksi tersembunyi antara variabel. Hasil dari pendekatan sistemik yang mereka ambil untuk memasukkan informasi yang tidak terkait langsung dengan limbah pangan memungkinkan mereka menantang beberapa faktor utama yang diidentifikasi dari limbah pangan yang dilaporkan dan didefinisikan dalam penelitian

sebelumnya serta untuk mengusulkan beberapa perubahan radikal pada desain kebijakan limbah pangan di Eropa.

Peluang sering dihasilkan oleh alat pendukung pengambilan keputusan yang didukung AI. Namun, tantangan yang dibawa oleh sebagian besar kerangka kerja terletak pada kesulitan untuk membuat proses pengambilan keputusan yang transparan dan mampu menangani sudut pandang yang kontradiktif. Sudut pandang dan proses pengambilan keputusan ini tidak bisa begitu saja diprogram, mereka perlu berlabuh pada keahlian manusia, terutama ketika merancang kebijakan pangan di mana proses pengambilan keputusan yang kompleks melibatkan kelompok pemangku kepentingan yang heterogen. Hal ini membuat keahlian menjadi penting. Ketika dihadapkan dengan kompleksitas, kunci untuk mengembangkan metode komputasi untuk sistem pertanian pangan adalah pemahaman bahwa interaksi manusia-komputer, akses ke para ahli dari berbagai bidang, dan pendekatan berulang sangat penting untuk membangun kesuksesan dan akurasi model.

Secara keseluruhan, ketika dirancang untuk SFS, AI harus dianggap sebagai teknologi yang dapat mendukung transisi sistem pangan berkelanjutan meskipun dengan kemungkinan konsekuensi yang tidak diinginkan dan dapat menggabungkan peningkatan produktivitas serta ketergantungan yang luar biasa. Potensi dampak transformatif dari perubahan yang didorong oleh AI, perlu dicerminkan dari perspektif sosial-ekonomi yang menyoroti kebutuhan untuk merancang layanan yang mencakup aspek teknologi, layanan, dan bisnis.

4. Nilai, Etika, dan Pertimbangan Filosofis

AI menimbulkan masalah tanggung jawab hukum dan etika serta kewajiban yang belum disepakati atau direalisasikan (Habash, 2018). Sebagian besar belum diketahui dan kondisi ini akan mendorong pemerintah untuk mengejar dampak sosial ekonomi yang tidak diinginkan. Seiring dengan membawa peluang transformatif, AI dan disiplin turunannya hadir dengan peringatan tentang risiko yang dibawanya. Beberapa tantangan ini masih baru dan secara khusus

terkait dengan bidangnya: pengambilan keputusan otomatis yang mengintegrasikan sudut pandang yang kontradiktif, menghubungkan hal-hal yang bertindak dengan agensi dan bahkan pendirian mereka sendiri, optimasi yang manusiawi ketika keahlian manusia digabungkan dengan pembelajaran mesin, atau hilangnya transparansi dan prediktabilitas yang terjadi membuat semakin cepat mesin belajar sehingga menurunkan kemauan manusia untuk memercayai atau mendelegasikan kontrol.

Masalah lain yang berasal dari AI dan *big data* dalam sistem pangan berasal dari ketegangan yang semakin parah antara rekayasa sosial dan teknis. Teknologi semakin memanfaatkan lingkungan data terbuka ketika nilai-nilai kemanusiaan perlu diseimbangkan dengan potensi penggunaan data dalam jumlah besar (Leone, 2017). Kumpulan data terbuka berpotensi membahayakan kerahasiaan teknik pertanian ketika risiko peretasan oleh pesaing dan kekuatan asing semakin tinggi. Ketertelusuran produk pangan yang didukung AI di seluruh rantai pasok dapat mengasingkan petani dengan memberi peluang pada pemerintah atau pesaing untuk melanggar hak privasi petani (Leone, 2017). Ini menambah pertimbangan keadilan lainnya bagi petani yang secara efektif menanggung beban investasi untuk lingkungan yang kaya data (petani harus berinvestasi dalam perangkat pemantauan dan mengatasi masalah komunikasi). Hal ini memengaruhi Leone (2017) untuk mengusulkan pendekatan etis dalam desain ketika norma dan hak fokus pada perlindungan aliran data di sektor pertanian pangan sambil menjaga kebiasaan dan pilihan pangan warga negara baik individu maupun kolektif.

Dalam aspek filosofis, “Kita bisa, tetapi haruskah kita melakukannya?” merangkum pandangan bahwa perlombaan menuju solusi menimbulkan masalah tanggung jawab dan etika dalam apa yang disebut Chan (2018) sebagai “kutukan kelayakan”. Jika “desain sebagai proses etis” muncul dari hal-hal buatan manusia, pertanyaan pertama dalam proses tersebut seharusnya tidak menanyakan apakah itu layak, tetapi apakah itu harus dilakukan dan bagaimana kebutuhan itu muncul. Setelah keputusan untuk membuat diputuskan, maka perancang dapat

mewujudkan moralitas dalam artefak sehingga memicu interaksi dan perilaku etis pada pengguna. Namun, hal ini meninggalkan pertanyaan terbuka tentang penilaian etis seperti dalam kasus teknologi otonom dan batas tanggung jawab yang tertanam dalam hal-hal yang kita buat dengan tingkat otonomi yang dikaitkan dengan keputusan manusia. Jika artefak teknologi adalah mediator hubungan dunia manusia, perancang bertanggung jawab untuk mengantisipasi peran mediasi mereka sekarang dan di masa depan.

5. Jenis Pengetahuan

Penelitian transdisipliner merupakan tantangan yang signifikan bagi peneliti individu yang dapat memiliki pengetahuan mendalam tentang semua disiplin ilmu yang terlibat. Mereka perlu menemukan cara baru untuk membatasi ruang lingkup tinjauan pustaka dan menerima bahwa pertanyaan penelitian akan berkembang seiring dengan pengetahuan baru yang diterima sehingga membuat tinjauan dan metode tersebut berevolusi. Tiga jenis pengetahuan dibuat dan akan dibahas di bagian ini. *Pertama*, pengetahuan sistem melihat status saat ini yang bertujuan untuk mengurangi ketidakpastian melalui peningkatan pemahaman tentang hubungan sebab akibat yang relevan dengan masalah. *Kedua*, pengetahuan target yang melibatkan visi untuk sistem baru ketika agenda penelitian ditetapkan serta implikasi nilai-nilainya. *Ketiga*, pengetahuan transformasi yang menerima bahwa disiplin ilmu tidak tertutup secara epistemologis atau metodologis, tetapi juga mereka siap untuk ditransformasikan dan bahwa transformasi tersebut berasal dari sintesis pengetahuan.

a) Pengetahuan Sistemik: Mengidentifikasi Tempat untuk Intervensi

Dalam Poin Leverage: tempat untuk campur tangan dalam suatu sistem, Meadows (1999) memberikan beberapa wawasan tentang cara kerja sistem dan menyatakan bahwa Poin Leverage sering kali berlawanan dengan intuisi sehingga sulit untuk mengetahui apa yang ada dalam sistem baru yang kita miliki. Melihat sistem pa-

ngan berkelanjutan dan pengaruh AI di semua bagiannya, sejumlah pertanyaan yang muncul di benak dari perspektif perubahan sistem.

Mengingat dua belas tempat untuk intervensi yang diusulkan oleh Meadows, Camaróna (2020) memeriksa bagaimana kekuatan AI di seluruh rantai pasok pangan dapat memiliki dampak mendalam pada sejumlah mekanisme kritis sistem. Sebagai contoh, mari kita pertimbangkan panjang penundaan relatif terhadap laju perubahan sistem (poin ke-9 dalam Meadows, 1999). Penundaan dalam *loop* umpan balik ini bisa berarti produksi pangan yang terlalu banyak atau bahkan bisa saja kurang. Ritel pangan sudah terdisrupsi oleh kemampuan AI untuk menyesuaikan permintaan konsumen dengan kenyamanan dan pengiriman pangan atau bahan pangan ke rumah. Tren “dapur gelap”, misalnya, menggambarkan pergeseran industri jasa pangan saat restoran tutup dan dapur yang mampu memberikan apa yang diinginkan konsumen secara *real-time* adalah cara pasar beradaptasi dengan realitas ritel baru ini. Dengan tren masa depan yang mengarah pada kendaraan *self-driving* untuk menangani pengiriman dan robot yang menyiapkan makanan cepat saji, transformasi ini baru saja dimulai. Kecerdasan buatan, seperti yang telah kita lihat, memungkinkan untuk menyesuaikan produksi dengan permintaan berdasarkan informasi langsung tentang konsumen, suasana hati, dan kebiasaan mereka sehingga berpotensi sangat memengaruhi penundaan antara produksi dan pengiriman. Dampak pada sistem pangan seperti yang kita ketahui kemungkinan akan menimbulkan beberapa manfaat seiring meningkatnya risiko ketidakstabilan.

Domain *loop* umpan balik negatif (poin ke-8 di Meadows, 1999) telah diubah oleh *big data* dan kemampuan alat bertenaga AI untuk membuat pemantauan serta pelaporan dalam skala yang belum pernah terlihat sebelumnya. Kemampuan AI untuk melakukan analisis sistemik, atau kemampuan “melukis gambar”, memberikan peluang untuk menghubungkan berbagai bidang penelitian, pendekatan meta multilevel, dan *multi-stakeholder* yang diperlukan untuk pengembangan dan pemantauan sistem pangan berkelanjutan. Karakteristik inilah yang sebagian besar memicu percakapan seputar penggunaan

pembelajaran mesin, pengenalan pola, pemodelan, dan prediksi yang digunakan dalam kebijakan pangan. Ini adalah kekuatan yang dapat dibawa AI ke masalah kompleks transisi ke sistem pangan berkelanjutan. Digabungkan dengan IoT dan komputasi, kemampuan pemantauan data, analisis, pemodelan, dan prediksi menghidupkan sejumlah besar titik data yang membantu menciptakan pemahaman yang lebih jelas tentang hubungan sebab akibat dalam sistem pangan berkelanjutan dan menginformasikan kebijakan. Misalnya, Rockström dkk. (2018) mengembangkan kerangka pelaporan SDG menggunakan dinamika sistem dengan seratus ribu titik data untuk menganalisis tujuh belas SDGs. Mengingat bahwa tujuan SDGs 2, 11, 12, dan 13 secara khusus terkait dengan pangan, efek dari memberikan umpan balik negatif tambahan akan sangat terasa di seluruh sistem pangan.

Dalam domain yang sama, kemampuan untuk menambah atau mengembalikan umpan balik yang hilang ke struktur aliran informasi (poin ke-5 dalam Meadows, 1999) adalah area yang telah diubah oleh disiplin AI. Umpan balik untuk mengatur sistem secara keseluruhan berarti meningkatkan akuntabilitas di berbagai bagian. Orang dapat membayangkan lingkaran umpan balik nitrogen yang melampaui batas-batas pertanian untuk memasukkan produksi nitrogen sintetis di satu ujung dan ekosistem sekitarnya di ujung lainnya. Hal ini dapat memberikan gambaran yang utuh tentang alur dan dampaknya serta menciptakan akuntabilitas.

AI, terutama *deep*, penguatan, dan pembelajaran tanpa pengawasan serta area lain yang menggunakan jaringan saraf, secara intrinsik merupakan struktur sistem yang diatur sendiri (poin ke-4 dalam Meadows, 1999) hingga tingkat yang sekali ditetapkan. Ia memiliki kekuatan untuk menambah, mengubah, dan berkembang secara mandiri. Ini adalah prinsip utama evolusi dan inovasi. Hal ini mungkin menjadi salah satu area yang lebih kritis ketika diskusi seputar etika, pentingnya desain sistem, dan kemungkinan bias bawaan adalah pertanyaan yang valid dalam konteks struktur yang diatur sendiri. Namun, untuk pertama kalinya dalam sejarah, umat manusia melihat struktur sistem yang diatur sendiri yang sepenuhnya buatan manusia.

Dampak dan konsekuensi dari hal ini tidak diketahui atau belum dipikirkan dari sudut sistem meskipun sejumlah besar penelitian terkait AI di bidang pertanian, pemrosesan dan pengemasan pangan, pengiriman, nutrisi, dan solusi ritel.

b) Pengetahuan Target: Kunci Maksud Desain untuk Menggunakan AI dalam Transisi ke SFS

Dalam pandangan sistem Meadows (1999), tanggung jawab untuk menetapkan tujuan dalam suatu sistem adalah Titik *Leverage* yang kritis (poin ke-3 dalam Meadows, 1999). Ini adalah salah satu area paling penting dan berpengaruh yang dapat membawa perubahan transformasional dalam waktu singkat.

Mari kita simak wacana AI di dunia korporasi dan komersial yang banyak menghadirkan referensi AI sebagai “penyelamat”: *AI for Good*, Memanfaatkan AI untuk bumi (PWC, 2018), 8 cara AI dapat menyelamatkan planet ini (Herweijer, 2018), Bisakah AI menyelamatkan sistem pangan kita? (Cecchini, 2017). Semua menggambarkan AI sebagai entitas, dekat dengan konsep “Juru selamat”. Morozov (2013) mengecam sikap Silicon Valley yang menyatakan bahwa “untuk menyelamatkan semuanya, klik di sini” telah lama menjadi pendekatan “dewa” teknologi di jalur solusi yang harus kita lewati.

Orang bisa berargumen bahwa cara AI dibicarakan di dunia nonakademik mungkin persis bagaimana perubahan paradigma (poin ke-2 dalam Meadows, 1999) terjadi; menunjuk pada apa yang tidak berhasil dan perlu dihemat, tidak kehilangan waktu dengan kaum reaksioner dan bekerja dengan agen perubahan yang aktif, serta jalan tengah yang luas dari orang-orang yang berpikiran terbuka.

Saat ini, skenario masa depan ditetapkan oleh *Big Tech* dan sektor teknik yang sering kali memiliki insentif finansial (yaitu: iklan atau lainnya) untuk mewujudkan masa depan ini. Namun, skenario masa depan yang dirancang bersama perlu direklamasi oleh masyarakat umum dan diinformasikan oleh para ahli di berbagai bidang, termasuk ahli teknik dan AI yang bersama-sama dapat menentukan tujuan penggunaan AI di bidang yang begitu vital (sistem pangan).

Seperti yang telah kita lihat, kepentingan untuk sistem pangan berkelanjutan di masa depan adalah kebutuhan untuk menciptakan solusi bersama, termasuk pemangku kepentingan di semua disiplin ilmu serta pemerintah dan masyarakat.

Sebagai mediator antara manusia, lingkungan, dan teknologi, perancang memiliki peran penting dalam merancang transisi ke sistem pangan berkelanjutan dengan AI sebagai instrumen perubahan. Desain berkaitan dengan lapisan makna, fakta ilmiah, keyakinan, dan perilaku serta menjembatani kesenjangan di antara mereka. Dengan semua aspek sistem pangan yang berperan, memahami peran AI dan kapasitasnya untuk menghambat atau mempromosikan keberlanjutan melalui produk, layanan, dan proses adalah keterampilan penting yang harus dimiliki perancang.

Pemikiran desain, alat, metode, dan kerangka kerja tidak hanya membantu kita memikirkan dampak AI sebagai sistem dalam transisi ke sistem pangan berkelanjutan, tetapi juga menyeimbangkan penciptaan artefak (baik digital, fisik, atau sosial) dengan kebutuhan lingkungan dan masyarakat. *Input* dan *output* siklus hidup produk dan jasa dapat dinilai dalam konteks penipisan dan pemborosan sumber daya, tetapi juga ketahanan yang kurang tercakup dalam literatur. Evaluasi kuantitatif dan kualitatif dari solusi yang diberdayakan oleh AI akan membantu memberikan kejelasan seputar energi AI yang terkandung dan klaim efisiensi dan produktivitas yang melingkupi penggunaan AI di SFS. Desain untuk transisi sistem dan inovasi perlu didasarkan pada prototipe material. Prototipe yang menanamkan dimensi etika dan keberlanjutan dalam aplikasi AI perlu menginformasikan strategi transisi SFS.

Mewujudkan moralitas dalam solusi bertenaga AI. Dilema bagi perancang adalah pada tingkat tanggung jawab yang dipercayakan kepada mereka yang tentu menyiratkan bahwa gagasan tentang etika, moralitas, serta tanggung jawab untuk masa kini dan masa depan dari apa yang dirancang, tetapi juga politik perlu dibicarakan secara terbuka dan transparan. Pola pikir ini merupakan bagian penting dari kerangka Desain Transisi yang membutuhkan keterbukaan, perhatian,

refleksi diri, dan kemauan untuk berkolaborasi serta terlibat dengan sistem berkelanjutan di masa depan. Teori mediasi Camaréna (2020) bisa menjadi pendekatan potensial untuk merancang AI di SFS dan area untuk penelitian lebih lanjut.

Untuk menyelesaikan masalah kompleks transisi sistem pangan berkelanjutan menggunakan AI, kita perlu berpikir dalam sistem hal-hal cerdas yang melampaui perangkat atau layanan dan mengatasi kompleksitas struktural dan perilaku yang dinamis. Ini adalah fitur penting dari pendekatan integral terhadap keseimbangan sosial, teknis, dan lingkungan. Hal ini bukan aspek baru dari penelitian dan praktik yang penting untuk memahami dampak sistemik AI dalam transisi sistem pangan dan perancang peran harus bermain dalam memutuskan bagaimana penggunaan AI ditingkatkan.

c) Pengetahuan Transformasi: Desain Bersama
Transdisipliner dalam Iterasi

Masa depan sistem pangan sudah diubah oleh AI. Pada bagian b, kita telah melihat sejauh mana strategi untuk mendekati transformasi telah dikembangkan dan diujicobakan. Kemampuan untuk bekerja lintas bidang disiplin dengan para ahli yang menunjukkan sudut pandang yang berbeda dan terkadang bertentangan. Diperlukan kecekatan dan iteratif karena visi, teori, dan pola pikir berkembang dari waktu ke waktu dan membutuhkan cara-cara baru dalam merancang. Merancang tidak harus dilakukan menuju solusi yang terbatas melainkan sebagai cara merancang untuk *versatile*, dengan pemahaman bahwa sementara tujuan ditetapkan, cara pencapaiannya diprototipekan dan direfleksikan secara berkelanjutan.

Solusi yang didorong oleh teknologi dapat dinilai kembali dengan mempertimbangkan jalur keamanan pangan dan gizi seperti tujuan untuk menghubungkan kembali sistem pangan untuk mendorong hubungan perkotaan-perdesaan. Misalnya, ketika para akademisi mengembangkan algoritma substitusi bahan, sebuah aplikasi dapat menghubungkan resep dengan bahan-bahan yang tersedia yang disediakan oleh produsen pangan lokal daripada mengandalkan

impor. Jika inovasi yang sama ditujukan untuk mendukung kelompok rentan yang baru muncul, substitusi bahan dapat digunakan untuk mendukung pengungsi menemukan bahan yang cocok untuk resep mereka yang lokal di rumah baru mereka daripada merasakan pemutusan intens kesenjangan budaya dan gizi. Terakhir, jika tujuannya adalah untuk menghubungkan kembali keberlanjutan dan kesehatan, algoritma substitusi bahan yang sama dapat digunakan untuk memberikan saran pangan rendah karbon yang sehat dan memenuhi persyaratan nutrisi dari diet seimbang.

Sebuah artefak, algoritma substitusi bahan, dilihat melalui lensa berbagai disiplin ilmu (ketahanan pangan, keberlanjutan, kesehatan) dapat digunakan untuk membentuk lintasan sistem. Dampaknya kemudian harus diukur tidak hanya sebagai seperangkat kriteria teknik, tetapi juga terhadap tujuan dan hasil utama yang ditentukan bersama oleh disiplin ilmu yang terlibat dalam penggunaannya. Ini harus terjadi ketika membuat prototipe, tetapi selama masa solusi untuk memastikan konsekuensi yang tidak diinginkan dapat ditindaklanjuti saat diketahui.

B. Memikirkan Kembali Model Bisnis Berkelanjutan dalam Skenario Covid-19

Dalam 20 tahun terakhir, para akademisi dan praktisi telah menaruh minat besar pada teknologi kecerdasan buatan (AI). Pertama, beberapa telah melakukan upaya untuk memberikan definisi AI. Untuk AI, beberapa penulis mengidentifikasi kemampuan “mesin” untuk memahami dengan cara “pintar” *input* yang diberikan oleh lingkungan, atau menguraikan variabel eksternal dengan konfigurasi yang fleksibel dengan lebih baik. Dalam arah ini, AI mewakili cara baru untuk membuat dan mengelola informasi dalam model bisnis yang dipikirkan kembali dengan benar, termasuk hubungan antara inovasi dan keberlanjutan. Lebih detail, inovasi muncul sebagai kekuatan untuk bisnis. Memang, adopsi teknologi inovatif dapat memungkinkan adopsi model bisnis dalam perspektif Agenda PBB 2030. Namun, model-model ini harus mencakup tiga dimensi utama, yaitu ekonomi,

lingkungan, dan sosial, yang semuanya saling bergantung. Lebih lanjut, telah digarisbawahi bahwa antarmuka antara sumber daya manusia dan teknis, serta sistem alam, memengaruhi pencapaian 17 tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs) yang termasuk dalam Agenda PBB 2030. Jika tidak, kebutuhan untuk memastikan nutrisi yang cukup untuk pertumbuhan populasi manusia terkait dengan sistem yang dapat menjamin produksi pertanian dan pangan yang berkelanjutan, dan dengan demikian meningkatkan efisiensi proses produksi dan mengurangi efek negatif terhadap lingkungan.

Dengan demikian, semakin banyak perusahaan yang menciptakan solusi untuk sistem pertanian pangan berdasarkan AI yang mampu memecahkan banyak masalah dan menghemat sumber daya berharga dengan mengurangi kerusakan lingkungan. Adopsi teknologi AI dalam manajemen proses membutuhkan model bisnis yang mencakup masalah yang berkelanjutan dan bertanggung jawab secara sosial. Oleh karena itu, ke arah ini, model bisnis ini menciptakan keunggulan kompetitif bagi perusahaan tanpa merusak lingkungan dan masyarakat; ini berarti bahwa model bisnis dapat didefinisikan sebagai berkelanjutan, dan dengan demikian disebut “model bisnis berkelanjutan”. Dalam konteks ini, para pemangku kepentingan dapat mengambil peran yang berbeda dalam penciptaan nilai (yaitu perilaku proaktif dalam adopsi AI dan praktik berkelanjutan dalam proses operasional; atau perilaku marginal, yang tidak relevan dibandingkan dengan teknologi mesin buatan).

Peran pemangku kepentingan (misalnya pemasok input produksi, lembaga publik, asosiasi konsumen, dan sebagainya) dalam rantai pasok dapat dianggap berasal dari kesadaran lingkungan terhadap pencapaian atau realisasi organisasi yang berkelanjutan, sesuai dengan pendekatan pembangunan berkelanjutan (PB) yang mencakup dimensi lingkungan, sosial, ekonomi, digital, dan pelatihan (Di Vaio dkk., 2020). Isu-isu ini tampaknya masih “terbuka” di industri pertanian pangan, yang harus menemukan keseimbangan antara teknologi dan bisnis yang bertanggung jawab. Dengan demikian, adopsi teknologi AI memerlukan pemikiran ulang yang mendalam

tentang “cara” untuk menjalankan bisnis, terutama proses operasional, dan secara lebih umum, desain ulang yang mendalam dari seluruh model bisnis dengan mempertimbangkan juga skenario ekonomi yang penuh ketidakpastian, seperti salah satunya karena pandemi Covid-19.

Kondisi ini menjadi tantangan yang bisa mendapat dukungan penting dalam teknologi di seluruh manajemen rantai pasok, dari petani hingga konsumen akhir, meskipun masih terhambat oleh kekurangan keterampilan umum yang mencegah penerapannya dalam skala yang lebih besar. Oleh karena itu, AI muncul sebagai teknologi inovatif yang dapat mendukung bisnis yang berjuang melalui pandemi Covid-19, terutama di industri pertanian pangan. Memang, AI diidentifikasi sebagai alat teknologi melawan efek pandemi. AI juga memungkinkan pengelolaan pandemi dengan menerapkan langkah-langkah *social distancing*.

Munculnya AI dan potensi yang ada di berbagai sektor masyarakat menentukan evaluasi dampaknya terhadap pembangunan berkelanjutan. Hal ini karena perusahaan semakin dituntut untuk menghadapi tantangan keberlanjutan, berusaha meningkatkan cakupan inovasi untuk menjaga keutuhan ekosistem, dan meningkatkan pemanfaatan sumber daya alam. Pertanian adalah pusat dari proses pembaruan yang mendalam. Hal ini berfokus pada teknologi digital, di atas segalanya, AI dan pembelajaran mesin, *Internet of Things* (IoT), *Cloud*, dan *Blockchain* untuk mewujudkan keterlacakan rantai pasok. Adopsi teknologi ini adalah salah satu cara yang paling penting untuk melindungi konsumen dan meningkatkan kualitas produksi pertanian. Di antara teknologi AI yang meningkatkan kualitas pertanian pangan dan layanan ritel, yang utama adalah: pembelajaran mesin dan pembelajaran mendalam, visi komputer, robot fisik dan robot perangkat lunak, serta pemrosesan dan generasi bahasa alami. Pembelajaran mesin adalah metode analisis data yang mengotomatiskan konstruksi model analitik. Ini adalah cabang AI dan didasarkan pada gagasan bahwa sistem dapat belajar dari data, mengidentifikasi model sendiri, dan membuat keputusan dengan intervensi manusia yang

minimal. Di bidang pertanian, misalnya, aplikasi seluler “didukung” oleh AI yang dipasok ke ahli agronomi dapat segera mengidentifikasi apa masalah dari tanaman. Adapun robot (fisik dan perangkat lunak) adalah mesin canggih yang dapat memecahkan masalah yang kurang lebih kompleks. Pertanian robot, misalnya, mempercepat tugas rutin, seperti panen atau pengemasan gulma dan buah. *Drone* dan traktor *self-driving* memungkinkan model pertanian presisi untuk diterjemahkan ke dalam ranah praktik. Dengan demikian, pertanian presisi merevolusi banyak aspek sistem produksi pertanian pangan, yaitu semua proses operasional. Memang pada kenyataannya, robot dapat menghitung secara tepat kondisi tanah dan tanaman atau terhubung ke satelit untuk memahami berapa banyak air yang benar-benar dibutuhkan tanpa membuang waktu. Informasi ini merupakan aset berharga yang juga memungkinkan petani untuk mengurangi penggunaan *input* anorganik, mesin, dan air menggunakan informasi tentang tanah, suhu, kelembapan, peralatan pertanian, ternak, pupuk, tanah, dan tanaman.

Dalam arah ini, pembangunan berkelanjutan (PB) perlu dicapai untuk menyelaraskan keuntungan, perlindungan sosial, dan penghormatan terhadap lingkungan. Agenda PBB 2030, termasuk semua 17 SDGs, menetapkan program aksi untuk manusia, planet, kemakmuran, dan perdamaian (Arruda Filho, 2017). Dengan demikian, SDGs menetapkan strategi pembangunan berkelanjutan yang baru bagi perusahaan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan proaktif bagi pemegang saham untuk menciptakan organisasi yang berkelanjutan dan bertanggung jawab yang ditujukan untuk berinvestasi dalam pengembangan teknologi, juga melalui kemitraan dengan perusahaan lain.

Peran AI dalam industri pangan menjadi semakin penting karena kemampuannya untuk membantu menghemat pangan, meningkatkan kebersihan tempat produksi, dan membersihkan lebih banyak peralatan pemrosesan dengan cepat. Oleh karena itu, ada banyak kasus penggunaan AI dan pembelajaran mesin di industri pangan. Sistem otomatis dapat dalam beberapa detik mengumpulkan ratus-

an data pada satu produk pangan. Sebuah sistem, misalnya, dapat mengumpulkan dan memproses data dari ratusan bahan individu saat mereka bergerak cepat di ban berjalan. Sistem ini dapat secara signifikan mengurangi biaya tenaga kerja dan pemborosan. Secara lebih rinci, di antara kasus penerapan teknologi AI dalam industri pangan, kita dapat mengamati beberapa hal berikut.

- a) AI untuk menyortir pangan—Salah satu aplikasi AI tercanggih di industri pangan adalah TOMRA Sorting Food yang menggunakan solusi berbasis sensor optik dengan kemampuan pembelajaran mesin. TOMRA menggunakan kamera dan sensor untuk memvisualisasikan pangan dengan cara yang sama seperti yang dilakukan konsumen. Dengan cara ini, mereka dapat memesannya sesuai dengan preferensi, menghemat waktu dan uang dalam produksi, dan meningkatkan kualitas produk.
- b) Optimalisasi pasokan industri pangan—AI membantu dalam manajemen rantai pasok dan teknologi dapat mendukung perusahaan untuk menguji dan memantau produk keamanan pangan di setiap tahap rantai pasok.
- c) AI untuk memastikan standar kebersihan—Sebuah kasus berhasil diwakili oleh perusahaan KanKan (Las Vegas, AS) yang telah berupaya menciptakan solusi cerdas untuk meningkatkan kondisi kebersihan di Tiongkok. Sistem, yang juga dapat digunakan di restoran, menggunakan kamera untuk memantau pekerja dan menggunakan perangkat lunak pengenalan wajah dan pengenalan objek untuk menentukan apakah pekerja memakai topi dan masker seperti yang dipersyaratkan oleh undang-undang keamanan pangan. Jika mendeteksi pelanggaran, perangkat lunak mengekstrak gambar layar untuk ditinjau (Garbie, 2010).
- d) Mempersiapkan makanan dan minuman untuk konsumen—Begitu halnya dengan Creator, sebuah restoran San Francisco menggunakan sistem yang dikendalikan oleh ratusan sensor dan diujicobakan oleh 20 mikrokomputer. Tugasnya adalah memastikan bahwa setiap bahan (dari daging hingga saus dan

rempah-rempah) didistribusikan dalam porsi yang diharapkan (Hu dkk., 2019).

Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa teknologi berpotensi menciptakan industri pangan yang lebih sehat dan berkembang bagi pekerja dan konsumen. Selain itu, teknologi lain (yaitu, *Blockchain*) memungkinkan rantai pasok pertanian pangan menjadi lebih terintegrasi serta meningkatkan keterlacakan dan keamanan pangan.

Berkat pengembangan teknologi yang sesuai, seperti AI, dimungkinkan untuk mencapai pengurangan limbah, dampak beracun dari surplus, kemiskinan, dan kekurangan gizi; ini berarti bahwa perusahaan yang berorientasi untuk mencapai beberapa SDG tertentu (yaitu, SDG ke-12 “Konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab”), memang untuk mencapai pertumbuhan ekonomi dan pembangunan berkelanjutan perlu mengurangi “jejak ekologis” dengan mengubah sistem produksi dalam hal operasi dan proses, dan “cara” mereka menggunakan barang dan sumber daya. Pertanian adalah pengguna air terbesar di seluruh dunia sehingga peningkatan sistem irigasi dalam hal efisiensi menjadi, di satu sisi, kebutuhan bagi perusahaan dan, di sisi lain, pendorong penting untuk mencapai pola berkelanjutan tambahan konsumsi pada tahun 2030. SDG ke-3 (Memastikan hidup sehat dan mempromosikan kesejahteraan untuk semua di segala usia) adalah peningkatan teknologi yang diadopsi untuk produksi pertanian pangan yang berkontribusi pada cakupan kesehatan dunia dengan mengurangi polusi udara dan air dan sanitasi yang tidak memadai dan merusak kesehatan.

Selain itu, penggunaan *drone* dan robot di ladang memungkinkan proses pengamatan dengan sempurna tentang status pematangan buah, kebutuhan untuk mengairi tanaman, atau menggunakan herbisida dan pestisida tepat waktu, yang secara eksponensial mengurangi kerusakan pada kesehatan manusia dan lingkungan. Menurut Vinuesa dkk. (2020), adopsi AI oleh perusahaan untuk meningkatkan efisiensi

proses pencapaian juga target keberlanjutan dapat berkontribusi untuk mencapai 17 SDGs, dengan efek signifikan pada masyarakat sipil dan lingkungan. Namun, efek pada SDGs bisa juga negatif. Misalnya, kelas yang lebih kaya dan lebih berpendidikan dapat memanfaatkan kekayaan AI untuk merugikan kelas yang kurang mampu. Selain itu, perusahaan mungkin juga tidak dapat mengelola dampak AI dalam jangka panjang, terutama terkait masalah privasi karena data aplikasi AI. Dalam konteks ini, konsep-konsep baru diperkenalkan, seperti “ekonomi ruang angkasa” dan “ruang lingkungan”.

Ekonomi luar angkasa baru saja dimulai, tetapi sudah diumumkan sebagai peluang besar untuk masa depan, seperti juga ditunjukkan dalam New Space Economy Expoforum 2019. Ekonomi baru ini melihat ke masa depan dan di luar angkasa melihat lingkungan baru untuk mengembangkan teknologi baru yang dapat berguna di Bumi yang dimulai dengan melayani industri farmasi dan pertanian presisi. Dalam proses ini, tantangan sebenarnya juga untuk mengetahui dan mencegah perubahan pasar yang timbul dari ketidakpastian akibat peristiwa, seperti pandemi Covid-19. Ini adalah kenyataan yang membentuk pasar global sebagai ekosistem ketika sektor publik dan sektor swasta hidup berdampingan serta melibatkan pemain baru, seperti petani, pengolah, distributor, dan sebagainya, serta investor yang mengajukan model bisnis yang harus memasukkan isu keberlanjutan dan tanggung jawab sehingga menjadi tantangan global baru.

Sebaliknya, melalui “prisma keberlanjutan”, telah ditunjukkan makna konseptual “ruang lingkungan” yang berfokus pada kriteria dimensi lingkungan dan sosial yang termasuk dalam ruang ini. Sedangkan “keberlanjutan” mencakup lebih banyak dimensi, seperti ekonomi dan kelembagaan. Setiap dimensi dapat didefinisikan sebagai sistem pengaturan diri yang kompleks yang dikombinasikan dengan tiga lainnya. Oleh karena itu, konsep ekonomi ruang angkasa dan ruang lingkungan mewakili area baru untuk dipertimbangkan secara terpisah atau bersama-sama dalam memikirkan kembali dan mende-sain ulang model bisnis berkelanjutan dalam pengaturan pertanian pangan. Bagaimanapun, tujuannya adalah untuk melibatkan semua

pemangku kepentingan sesuai dengan “nilai pemangku kepentingan” berdasarkan prinsip bahwa tujuan perusahaan adalah untuk menghasilkan nilai bagi semua pemangku kepentingannya. Dalam hal ekosistem baru ini, yaitu perusahaan besar dan kecil di sektor luar angkasa, lembaga antariksa, pemerintah, pengguna dan investor internasional, sudut bisnis dan modal ventura, usaha kecil dan menengah (UKM) yang inovatif, *start-up* dan inkubator, pusat penelitian, dan universitas sehingga menciptakan sistem dan mendorong pertemuan antara industri, dunia luar angkasa, dan penelitian.

1. Implikasi Teoretis dan Manajerial

Pertama, meskipun AI dianggap sebagai solusi teknologi untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas sektor dan peran kuncinya diakui dalam adopsi untuk berkontribusi dalam mencapai SDGs. Akan tetapi, analisis tentang keterlibatan pemangku kepentingan dan pentingnya mereka dalam proses ini masih belum ada. *Kedua*, masalah AI (dan lebih umum lagi, teknologi baru), di satu sisi, membuka jalan untuk mempertimbangkan sektor pertanian pangan sebagai suatu ekosistem yang memungkinkan organisasi publik dan swasta untuk hidup berdampingan di area yang sama, tetapi di sisi lain semua pemangku kepentingan yang terlibat dalam rantai pasok (yaitu, petani, pengolah, investor, dan sebagainya) dianggap sebagai pelaku model bisnis yang didasarkan pada tema keberlanjutan dan bertanggung jawab. Oleh karena itu dalam literatur, perhatian pada peran pemangku kepentingan dalam proses perubahan berupa memikirkan kembali dan mendesain ulang model bisnis untuk keberlanjutan, masih kurang dibahas. Namun demikian, beberapa akademisi yang berfokus pada isu-isu keberlanjutan telah menyoroti bahwa perdebatan akademis masih hilang pada praktik berkelanjutan yang diadopsi oleh perusahaan untuk mendapatkan model organisasi yang berkelanjutan (Nguyen Dang Tuan dkk., 2019). Oleh karena itu, “kesadaran lingkungan” dari perusahaan dan khususnya semua pemangku kepentingan yang terlibat dalam rantai pasok pertanian pangan, masih menjadi isu terbuka untuk literatur yang harus me-

nyediakan panduan yang jelas untuk menyelidiki semua dimensinya dalam perspektif sistemik, termasuk isu-isu lingkungan, ekonomi, sosial, digital, dan pelatihan/pendidikan menuju pencapaian SDGs.

Dalam hal ini, untuk organisasi pertanian pangan, penggunaan AI ditujukan untuk mengidentifikasi solusi untuk meningkatkan daya saing bisnis dan membatasi dampak negatif terhadap lingkungan. Dengan demikian, AI memiliki potensi untuk mengatasi beberapa tantangan paling mendesak bagi masa depan umat manusia, seperti pencapaian SDGs.

Menurut Barro dkk. (2019), keberhasilan organisasi akan tergantung pada kemampuan mereka untuk menginovasi operasi, produk, dan layanan, melalui modal manusia mereka. Memang, bahkan jika AI akan menghilangkan beberapa pekerjaan dalam dekade berikutnya, itu dapat membuka peluang baru yang luas untuk kolaborasi antara manusia dan mesin. Beberapa akademisi juga telah meneliti aspek etika dan sosial yang terkait dengan penggunaan AI dan mencatat bahwa evolusi otomatisasi perusahaan dapat menonjolkan perbedaan antara orang dan negara yang lebih maju. Jika lembaga-lembaga politik tidak melakukan intervensi untuk mengurangi jarak antara negara-negara kaya yang berteknologi maju dan negara-negara dengan ekonomi yang lebih miskin dan kurang maju, teknologi kemungkinan akan berkontribusi pada peningkatan ketimpangan. Oleh karena itu, tujuan ini mendorong perusahaan untuk mengadopsi praktik berkelanjutan, mendukung negara berkembang dalam meningkatkan kemampuan ilmiah dan teknologi mereka, serta mengembangkan dan menerapkan model dan alat produksi dan konsumsi yang lebih berkelanjutan untuk memantau dampak pembangunan berkelanjutan.

Dengan cara ini, seperti yang disebutkan sebelumnya dan seperti yang digarisbawahi oleh banyak peneliti tidak hanya tentang teori pemangku kepentingan (Boccia & Sarnacchiaro, 2018; Ørtenblad dkk., 2020), peran semua pemangku kepentingan sangat penting bagi pengembangan keseluruhan sistem pertanian pangan, baik untuk inovasi teknologi maupun untuk evolusi berkelanjutan dari sistem, dan untuk penciptaan metode manajemen cangghih yang dapat

mendukungnya. Inovasi di bidang pertanian pangan diperlukan untuk menciptakan pasokan pangan yang berteknologi dan berkelanjutan. Difusi pengecer global dan pengenalan saluran distribusi dan sumber modern, dikombinasikan dengan permintaan domestik yang besar untuk produk-produk berkualitas lebih tinggi, telah menyebabkan transformasi signifikan dalam sistem ritel pangan di mana-mana. Jadi, sektor pertanian pangan membutuhkan perubahan evolusioner untuk membentuk kembali institusi. Mengukur inovasi dan keberlanjutan dimungkinkan berdasarkan tolok ukur dan membutuhkan kesepakatan pemangku kepentingan tentang nilai-nilai keberlanjutan.

Pentingnya berbagai pandangan sosial dan keterlibatan berbagai pemangku kepentingan dalam inovasi pertanian pangan semakin jelas. Sasaran fleksibel dibandingkan dengan manajemen inovasi yang berorientasi pada proses sangat penting, tetapi begitu juga peran penting laba dalam menopang pembangunan berkelanjutan dalam bisnis: hal itu sesuai dengan konsep inovasi evolusioner. Tidak ada satu solusi terbaik untuk membuat sektor pertanian pangan lebih berkelanjutan di seluruh dunia, kecuali kombinasi dari berbagai solusi dan pendekatan berbagai kemungkinan yang akan memberikan jalan terbaik ke depan. Peran menentukan yang dapat dimainkan oleh para pemangku kepentingan dalam mengidentifikasi, mengembangkan, dan mempromosikan teknologi AI baru adalah mereka harus mampu mengembangkan sistem pertanian pangan menuju dimensi baru yang sudah ada dalam waktu dekat, baik dari segi ekonomi maupun dalam hal keberlanjutan dan manajemen bisnis, sesuai dengan apa yang ada dalam kemungkinan inovatif yang juga ditentukan oleh ekonomi ruang angkasa baru.

Kita berbicara tentang dunia yang sangat maju dan cerdas di sini. Dunia teknologi kognitif yang bersifat disruptif dan transformatif. AI telah mendapat posisi tersendiri di industri pangan. Pembahasan kita akan mulai meluas pada kemasan pintar di bab selanjutnya. Pertumbuhan penggunaan kecerdasan buatan dalam pengemasan tidak kalah menarik. Ketika kita berbicara tentang penerapan layanan AI di industri pengemasan, menyortir barang daur ulang bukanlah bentuk

penerapan yang muncul pertama kali di benak kita. Namun, hubungan antara AI dan pengemasan sebenarnya sangat cocok. Dengan jumlah sampah yang terakumulasi dan berakhir di lautan setiap hari, kita perlu meningkatkan upaya daur ulang kita dengan margin yang sangat besar. Menyortir barang sangat penting untuk memastikan produk daur ulang dan produk sampingan dapat digunakan secara efektif. Namun, ini adalah pekerjaan yang berulang, melelahkan, dan memakan waktu yang menawarkan nilai rendah bagi manusia. Menggunakan AI untuk tujuan ini akan memberikan manfaat yang besar. Secara lebih khusus sistem pengemasan dijelaskan dalam Bab VIII.



BAB 8

Sistem *Smart Packaging* (Kemasan Pintar)

A. Peluang dan Tantangan Kemasan Pintar

Tujuan utama pengemasan adalah untuk melindungi produk dari efek buruk yang disebabkan oleh paparan dan penggunaan di lingkungan eksternal. Selain itu, kemasan produk berfungsi sebagai sarana pemasaran yang efektif untuk berkomunikasi dengan konsumen. Kemasan produk muncul dalam berbagai bentuk dan ukuran serta, sebagai antarmuka pengguna, memberi konsumen kemudahan penggunaan dan kenyamanan. Fungsi utama kemasan produk telah dikategorikan menjadi: perlindungan, komunikasi, kenyamanan, dan penahanan. Misalnya, kemasan yang digunakan dalam produk pangan biasanya berfungsi sebagai berikut.

- a) Untuk mencegah produk bocor atau pecah dan untuk melindungi dari kemungkinan kontaminasi.
- b) Untuk mengomunikasikan informasi penting tentang produk pangan yang terkandung dan kandungan nutrisinya serta untuk memberikan instruksi memasak.

- c) Untuk memberikan kemudahan seperti memungkinkan konsumen untuk memanaskan kembali pangan yang ditampung dalam *microwave*.
- d) Untuk menyediakan penahan dalam memudahkan transportasi dan pemrosesan.

Namun, kemasan tradisional tidak lagi memadai karena ekspektasi pengalaman konsumen yang terus meningkat, kompleksitas produk yang meningkat, dan, yang terbaru, inisiatif nasional dan internasional untuk mendorong ekonomi sirkular dan meminimalkan jejak karbon dari produk manufaktur. Kemasan yang inovatif dengan fungsionalitas yang ditingkatkan juga diperlukan untuk mengakomodasi berbagai kebutuhan konsumen. Adapun contohnya yaitu menawarkan pangan yang diproses dengan pengawet yang lebih sedikit, produk yang memenuhi persyaratan peraturan yang lebih tinggi, dan kemasan yang memungkinkan pelacakan dari awal hingga akhir dan dengan demikian dapat berfungsi sebagai perlindungan terhadap tuntutan hukum. Selain itu, kemasan cerdas berfungsi sebagai sarana perluasan pasar dalam konteks globalisasi, membantu mengakomodasi peraturan keamanan pangan nasional dan internasional yang lebih ketat dan bahkan berfungsi sebagai perlindungan terhadap potensi ancaman bioterrorisme pangan.

Selama dua dekade terakhir, istilah seperti *active packaging*, *intelligent packaging*, dan *smart packaging* telah muncul dalam literatur dan sering digunakan secara bergantian. Mereka semua mengacu pada sistem pengemasan yang digunakan untuk makanan, minuman, obat-obatan, kosmetik, dan banyak barang mudah rusak lainnya. Sebenarnya, orang harus benar-benar membedakan antara kemasan cerdas, pintar, dan aktif.

- a) Kerry dkk. (2006) mendefinisikan kemasan aktif sebagai “penggabungan aditif tertentu ke dalam sistem pengemasan dengan tujuan mempertahankan atau memperpanjang kualitas produk dan umur simpan”.

- b) Otles dan Sahyar (2016) mendefinisikan pengemasan cerdas “sebagai sistem pengemasan yang mampu menjalankan fungsi cerdas (seperti penginderaan, pendeteksian, penelusuran, perekaman, dan komunikasi) untuk memfasilitasi pengambilan keputusan guna memperpanjang umur simpan, meningkatkan kualitas, meningkatkan keamanan, memberikan informasi, dan memperingatkan tentang potensi masalah”.
- c) Beberapa penulis lain, termasuk Vanderroost dkk. (2014), mendefinisikan kemasan pintar sebagai “yang memiliki kemampuan kemasan cerdas dan aktif. Pengemasan cerdas memberikan solusi pengemasan total yang di satu sisi memantau perubahan produk atau lingkungan (cerdas) dan di sisi lain bertindak atas perubahan ini (aktif)”.

1. Teknologi yang Mendasari Sistem Pengemasan

Teknologi dasar pengemasan bervariasi tidak hanya dalam hal perangkat keras, tetapi juga dalam jumlah dan jenis data yang dapat dihasilkan, ditangkap, diproses, dan didistribusikan.

a. Kemasan Aktif

Pengemasan aktif adalah alternatif pertama untuk metode pengemasan tradisional. Ini mengacu pada konsep kemasan pangan inovatif yang diperkenalkan sebagai tanggapan terhadap perubahan terus-menerus dalam permintaan konsumen dan tren pasar. Teknologi pengemasan aktif menanamkan komponen ke dalam kemasan yang mampu melepaskan atau menyerap zat dari atau ke dalam pangan yang diawetkan atau lingkungan sekitarnya untuk mempertahankan kualitas dan memperpanjang umur simpan. Keuntungan menggunakan kemasan aktif untuk barang yang mudah rusak adalah termasuk pengurangan jumlah zat aktif, pengurangan aktivitas lokalisasi dan migrasi partikel dari film ke pangan, dan penghapusan proses industri yang tidak perlu yang mungkin memasukkan bakteri ke dalam produk. Komponen

yang sering digunakan dalam sistem pengemasan aktif termasuk pemulung oksigen, pemulung etilen, penyerap/pelepas rasa dan bau, antimikrob, dan antioksidan.

b. Kemasan Cerdas

Menurut Kerry dkk. (2006), kemasan cerdas terutama digunakan ‘untuk memantau kondisi pangan kemasan, seperti daging, dengan memberikan informasi tentang kualitas barang yang dikemas selama transportasi dan penyimpanan.’ Sistem kemasan cerdas menggunakan fungsi komunikasi untuk memfasilitasi pengambilan keputusan yang bertujuan untuk menjaga kualitas pangan, memperpanjang umur simpan, dan meningkatkan keamanan pangan secara keseluruhan. Ia mampu menjalankan fungsi-fungsi cerdas seperti pengindraan, pendeteksian dan penelusuran, serta perekaman dan komunikasi jenis informasi tertentu. Dengan demikian, sistem kemasan cerdas terdiri dari komponen perangkat keras seperti indikator suhu waktu, detektor gas, indikator kesegaran dan/atau pematangan, dan sistem identifikasi frekuensi radio (RFID). Fungsi yang diperlukan dapat diimplementasikan dan direalisasikan melalui indikator dan perangkat sensor untuk mengomunikasikan informasi terkait. Indikator menginformasikan tentang perubahan yang terdeteksi dalam suatu produk atau lingkungannya, misalnya perubahan suhu atau tingkat pH. Dalam pengemasan pangan, teknologi ini sering dilengkapi dengan biosensor untuk mendeteksi, merekam, dan mengirimkan informasi terkait proses dan reaksi biologis potensial yang terjadi di dalam kemasan, misalnya perubahan tingkat oksigen dan kesegaran.

c. Kemasan Pintar

Menurut Vanderroost dkk. (2014), “kemasan pintar memberikan solusi pengemasan total yang di satu sisi memantau perubahan produk atau lingkungannya (cerdas) dan di sisi lain bertindak atas perubahan ini (aktif)”. Kemasan pintar menggunakan sensor kimia atau biosensor untuk memantau kualitas dan keamanan pangan dari produsen hingga konsumen. Seperti teknologi yang dibahas sebelumnya, kemasan pintar menggunakan berbagai sensor untuk memantau kualitas dan

keamanan pangan, misalnya dengan mendeteksi dan menganalisis kesegaran, patogen, kebocoran, karbon dioksida, oksigen, tingkat pH, waktu, atau suhu. Kemasan pintar akan banyak dibahas penerapannya dalam rantai pasok pangan di bagian B.

Fungsionalitas yang tepat dari solusi pengemasan pintar bervariasi dan bergantung pada produk yang dikemas, misalnya makanan, minuman, obat-obatan, atau berbagai jenis produk kesehatan dan rumah tangga. Demikian pula, kondisi yang tepat untuk dipantau, disampaikan, atau disesuaikan bervariasi. Kemasan pintar memungkinkan untuk melacak produk sepanjang siklus hidupnya dan untuk menganalisis dan mengontrol lingkungan di dalam atau di luar kemasan untuk memberi tahu produsen, pengecer, atau konsumennya tentang kondisi produk pada waktu tertentu.

2. Area Aplikasi dan Peluang Pasar

a. Area Aplikasi

Berdasarkan temuan Pereira dkk. (2018), lebih dari 6 juta kasus penyakit bawaan pangan terjadi setiap tahun di Amerika Serikat, berpotensi menyebabkan lebih dari 9.000 kematian. Diperkirakan di Spanyol, terdapat 60 kasus *foodborne disease* per 100.000 penduduk setiap tahunnya. Oleh karena itu, tidak mengherankan bahwa salah satu bidang aplikasi utama teknologi pengemasan pintar adalah pengembangan biosensor untuk mendeteksi patogen dalam pangan. Area aplikasi lainnya termasuk peredam kelembapan, solusi pengemasan antimikrob, penghasil karbon dioksida, pemulung oksigen, dan antioksidan yang tertanam dalam kemasan.

Secara umum, teknologi pengemasan pintar memiliki berbagai bidang aplikasi potensial mulai dari pemantauan keamanan pangan dan penggunaan obat, hingga pelacakan pengiriman barang melalui pos melalui tag keamanan yang disematkan. Dari perspektif konsumen, peluang tersebut dianggap sebagai manfaat nilai tambah. Di zaman sekarang ini, orang-orang yang terhubung secara permanen ke internet, cara baru untuk melacak dan memantau barang yang dibeli dengan aplikasi terkait, telah berubah menjadi peluang bisnis yang

penting bagi perusahaan untuk meningkatkan kepuasan dan loyalitas konsumen. Kemasan cerdas juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi inefisiensi rantai pasok, mengurangi biaya dan kesalahan, meningkatkan kinerja produk, dan pada akhirnya meningkatkan margin keuntungan.

b. Peluang Pasar Global

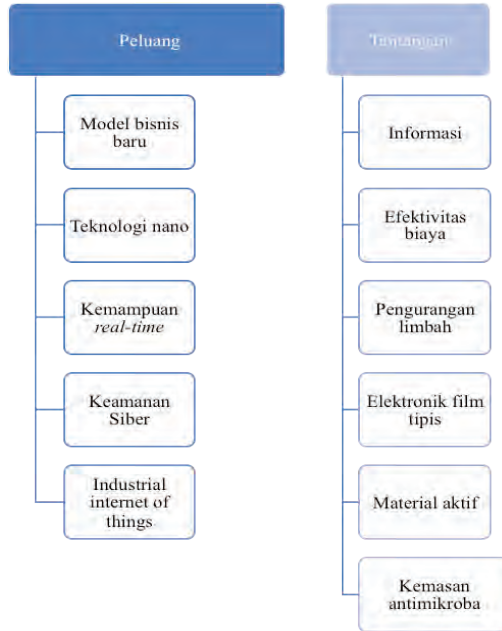
Pasar global untuk sistem pengemasan canggih masing-masing berada pada level US\$31,4 miliar pada tahun 2011 dan US\$33,3 miliar pada tahun 2012. Permintaan global untuk kemasan pintar elektronik diperkirakan akan tumbuh menjadi lebih dari US\$1,45 miliar selama dekade berikutnya (Das dan Chansin, 2013). Menurut temuan Fuertes dkk. (2016), di AS, jenis kemasan ini diperkirakan akan terus berkembang dengan tingkat pertumbuhan tahunan sebesar 7,4% dan mencapai US\$3,6 miliar pada dekade berikutnya. Pasar terbesar kedua adalah Jepang dengan nilai setara US\$2,36 miliar, disusul Australia setara US\$1,69 miliar; Inggris, setara dengan US\$1,27 miliar; dan terakhir Jerman, pada tingkat yang setara dengan US\$1,4 miliar.

3. Tantangan dan Peluang

Menurut PBB (2017), sekitar sepertiga (lebih dari 1,3 miliar metrik ton) dari semua produk yang dapat dimakan untuk konsumsi manusia hilang atau terbuang setiap tahunnya. Hal ini disebabkan oleh praktik dan kondisi yang buruk dalam hal pemanenan, pengangkutan, dan penyimpanan barang. Pemborosan pangan yang sangat besar ini merupakan beban keuangan yang signifikan bagi industri pangan untuk diatasi. Oleh karena itu, merancang kemasan yang memadai untuk barang-barang yang mudah rusak sangat penting dalam hal memungkinkan periode transportasi dan penyimpanan yang lebih lama dan dengan demikian memperpanjang umur simpan.

a. Tantangan

- 1) Kemasan antimikrob mendapatkan minat dari para akademisi dan industri karena potensinya untuk memberikan manfaat kualitas dan keamanan. Penelitian masa depan di bidang ke-



Sumber: Schaefer & Cheung (2018)

Gambar 8.1 Tantangan dan Peluang Pengemasan Cerdas

masan aktif mikrob bisa semakin fokus pada agen antimikrob yang diturunkan secara alami, pengawet bio, dan solusi *biodegradable*. Sebagai contoh, teknologi pengemasan *biodegradable* dengan peningkatan kualitas dan keamanan telah menghasilkan sejumlah inovasi di bidang pengemasan dan berkontribusi pada peningkatan kualitas dan keamanan pangan yang membuktikan kelayakan komponen fungsional bioaktif.

- 2) Pengembangan lebih lanjut dari apa yang disebut bahan aktif juga penting karena mampu mempertahankan sifat mekanik dan penghalang aslinya. Ini akan lebih meningkatkan keamanan pangan dan memperpanjang umur simpan. Penggunaan senyawa aktif yang berasal dari sumber daya alam juga diharapkan terus

berkembang begitu pun penggabungan bahan kemasan *biodegradable* sebagai polimer pembawa.

- 3) Penelitian dan pengembangan elektronik film tipis untuk diintegrasikan ke dalam teknologi pengemasan adalah bidang yang menantang. Vanderroost dkk. (2014) menunjukkan bahwa integrasi elektronik film tipis ke dalam sistem sensor tercetak dan fleksibel dapat digunakan untuk pelacakan suhu untuk memantau barang yang mudah rusak. Namun, kinerja masih menjadi masalah yang harus diselesaikan.
- 4) Diketahui bahwa limbah yang dihasilkan dari kemasan pintar sebagian besar tidak berkelanjutan untuk didaur ulang dan dengan demikian menimbulkan tantangan besar bagi industri (Cushen dkk., 2012). Meskipun kebijakan pemerintah untuk daur ulang dan pengolahan limbah kemasan telah berlangsung cukup lama, pengalaman praktis menunjukkan bahwa daur ulang beberapa jenis limbah kemasan terbukti sulit. Oleh karena itu, salah satu tantangan utama dalam desain dan pembuatan kemasan pintar adalah memajukan penelitian tentang pengolahan dan daur ulang limbah kemasan, atau, misalnya, untuk menemukan bahan yang lebih cocok dan memungkinkan penerapan fungsi sensor serta komunikasi yang bersifat *biodegradable*.
- 5) Limbah pangan dapat terjadi pada titik yang berbeda dalam rantai pasok pangan. Seperti yang telah disinggung sebelumnya, begitu pangan memasuki rantai pasoknya, kemasannya mulai memainkan peran penting dalam menjaganya agar tetap aman, segar, dan berkualitas tinggi. Namun, penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan pengemasan di sepanjang siklus hidup ini diperlukan hal-hal berikut.
 - a) Kelemahan umum dalam pengemasan berkaitan dengan penyegelan produk yang tidak dapat diandalkan yang, misalnya, dapat menyebabkan masalah, seperti tumpahan biji-bijian dari karung yang mengakibatkan daya tarik hewan

pengerat dan pada gilirannya dapat menyebabkan investasi yang lebih besar.

- b) Peraturan tentang penjualan dan pendistribusian lebih lanjut barang-barang yang mudah rusak selama pengangkutan.
- c) Pangan yang akan mencapai titik akhir masa pakainya mungkin harus diproses secara berbeda, misalnya untuk menghindari pemberian kembali ke ternak yang dapat menyebabkan pecahnya epidemi besar sehingga menyebabkan kerugian finansial yang besar.

Kuswandi dkk. (2011) mengusulkan bahwa meningkatnya kebutuhan informasi untuk disematkan dalam kemasan merupakan tantangan khusus bagi perusahaan penghasil pangan. Mereka menyimpulkan bahwa penelitian lebih lanjut mengenai hal ini akan mendorong kebutuhan akan pengemasan yang lebih cerdas.

- a) Semakin banyak konsumen yang berharap dapat memperoleh akses mudah ke informasi mulai dari bahan suatu produk, asalnya, dan kondisi produk tersebut telah terpapar saat dalam transportasi ke toko ritel atau rumah mereka.
- b) Pelabelan dan stiker yang cerdas diharapkan mampu berkomunikasi langsung dengan konsumen melalui perangkat film tipis yang memberikan informasi keamanan pangan visual.
- c) Petunjuk keselamatan dan pembuangan visual pada produk farmasi dan kesehatan harus disediakan untuk menginformasikan konsumen tentang cara aman mengonsumsi produk dan cara membuangnya setelah kedaluwarsa.
- d) Sistem pengiriman obat berbasis teknologi pengemasan pintar diharapkan dapat lebih meningkatkan pelayanan kesehatan dan keselamatan pasien dengan menyampaikan informasi terkait kepada dokter dan penyedia layanan kesehatan. Sepanjang kepentingan yang sama, mereka dapat membantu untuk mencegah penyalahgunaan dan penipuan.

b. Peluang

1) Nanoteknologi

Nanoteknologi kemungkinan akan memainkan peran penting dalam waktu dekat, dengan tetap mempertimbangkan masalah keamanan yang terkait dengan pengemasan. Menurut Majid dkk. (2018), peluang kuncinya adalah kebutuhan dan pengembangan bahan pengemas canggih yang sesuai dan aman. Bahan-bahan ini akan digunakan untuk mengontrol pelepasan zat aktif dalam hubungannya dengan sensor yang tertanam dalam sistem pengemasan.

2) *Industrial Internet of Things* (IIoT)

Industrial Internet of Things (IIoT) adalah sebuah konsep yang bertujuan untuk menyediakan infrastruktur jaringan yang saling terhubung secara global untuk menghubungkan objek ke dunia siber. Ini memungkinkan pelacakan dan kontrol perangkat yang dilengkapi dengan sensor dan aktuator. Misalnya, objek kemasan yang dilengkapi dengan *tag* RFID dapat dengan mudah dilacak sepanjang perjalanannya dari produsen ke konsumen. Untuk layanan pengiriman *e-commerce*, UPS memperkirakan 1% dari pengiriman mereka hilang atau rusak (UPS, 2018). UPS mengirimkan sekitar 4,6 miliar paket setiap tahun dan ini setara dengan 4,6 juta paket yang hilang atau rusak setiap tahun. Oleh karena itu, integrasi kemasan pintar ini berpotensi mengurangi kehilangan paket UPS secara signifikan. Pada tahun 2025, tidak hanya ponsel, tablet, laptop, dan komputer pribadi yang akan menjadi bagian dari *Internet of Things*, peralatan lain seperti paket pangan, furnitur, mobil, kapal, dan bahkan mesin manufaktur dan seluruh pabrik akan menjadi bagian dari *Industrial Internet of Things* (IIoT).

3) Kemampuan *Real-Time* dan CPS

Salah satu bidang utama untuk kemajuan dan peningkatan lebih lanjut dalam teknologi pengemasan adalah pemantauan, pengelolaan, dan pengendalian kondisi barang secara *real-time*. Kemampuan ini secara signifikan akan memengaruhi keamanan

pangan, kesehatan konsumen, dan pengurangan limbah. Faktor pendorongnya adalah keberadaan infrastruktur IIoT yang andal dan Teknologi Informasi dan Komunikasi terkait yang disematkan ke dalam kemasan dan seluruh rantai pasok produk yang bersangkutan. Secara teknis, ini disebut sebagai penciptaan jaringan produksi dan pengiriman *cyberphysical*, baik di tingkat vertikal (dalam satu perusahaan) maupun horizontal (di beberapa perusahaan). Untuk mendapatkan manfaat lebih lanjut dari digitalisasi siklus hidup dan rantai pasok, kecerdasan buatan diharapkan dapat segera memainkan peran yang lebih signifikan dalam meningkatkan pembelajaran mesin, penambangan data, dan sistem pendukung keputusan yang mampu menyesuaikan proses secara *real-time* dan berdasarkan *big data*.

4) Keamanan Siber

Meskipun banyak kemungkinan baru dan teknologi yang muncul, namun keamanan siber menjadi perhatian utama. Teknologi internet yang ada diganggu oleh keamanan siber dan masalah privasi data yang dapat menghadirkan tantangan besar. Jika tantangan ini tidak ditangani dengan tepat, potensi penuh kemasan pintar sebagai salah satu domain aplikasi paling menarik dalam konteks Industri 4.0 mungkin tidak akan pernah tercapai. Lanskap keamanan internet modern dicirikan oleh serangan yang banyak, terus berkembang, sangat cepat, persisten, dan sangat canggih. Karakteristik ini memberikan tantangan yang signifikan pada layanan keamanan preventif. Akibatnya, metodologi yang memungkinkan deteksi dan respons otonom terhadap serangan siber harus digunakan secara sinergis dengan teknik pencegahan untuk mencapai strategi pertahanan mendalam yang efektif dan sistem keamanan siber yang kuat. Ini berlaku untuk semua sistem fisik-siber secara umum, tidak hanya untuk pengemasan cerdas.

5) Model Bisnis Baru

Seiring dengan digitalisasi yang sedang berlangsung di sektor pengemasan pintar, model bisnis baru yang memanfaatkan peluang baru harus dikembangkan. Konsumen semakin mencari semacam pengalaman, maka sektor industri melihat pergeseran

dari produk (paradigma masa lalu) menuju sistem-produk-layanan (paradigma baru). Rantai nilai tradisional dan model bisnis diperkirakan akan segera mendapat tekanan yang meningkat. *Big data* dan digitalisasi di seluruh sektor sudah mulai menantang mereka. Berkaca pada teknologi disruptif di masa lalu, terbukti bahwa ada korelasi yang kuat antara perkembangan teknologi dan model bisnis dan bahwa menggunakan teknologi terbaru bersama dengan model bisnis yang inovatif adalah resep untuk sukses. Ini dapat diharapkan berlaku untuk arena pengemasan pintar yang berkembang juga. Mengingat minat yang kuat dari sektor manufaktur pada analitik *big data*, tidak mengherankan bahwa ide berdasarkan peluang dan model bisnis berbasis data saat ini mendominasi diskusi.

Seperti disebutkan sebelumnya, pengemasan pintar memberikan solusi pengemasan total yang mencakup kemampuan aktif dan cerdas. Mempertimbangkan segudang tantangan yang disebutkan sebelumnya, menggabungkan dan mengintegrasikan konsep pengemasan aktif dan cerdas ini ke dalam sistem yang berfungsi penuh dan andal adalah tugas yang sangat besar dan diharapkan dapat memberikan landasan yang menarik bagi penelitian mendasar dan terapan untuk tahun-tahun mendatang.

Kemasan pintar bergantung pada pengembangan teknologi dan bahan sensor untuk menginformasikan kualitas, keamanan, masa simpan, dan kegunaannya. Oleh karena itu, masa depan pengemasan pintar untuk meningkatkan teknologi pengemasan saat ini membutuhkan beberapa aspek berikut.

- a) Peningkatan teknologi sensor untuk menggabungkan bahan cerdas dan konvensional serta menambah nilai dan manfaat di seluruh rantai pasok kemasan pangan.
- b) Teknologi sensor masa depan akan terdiri dari elektronik film tipis, bahan pintar, dan teknologi Nano untuk diintegrasikan dalam kemasan. Oleh karena itu, mereka harus cocok untuk teknologi percetakan dan produksi massal, mewakili

biaya rendah relatif terhadap nilai produk pangan, mudah digunakan, ramah lingkungan, serta aman digunakan untuk manusia.

- c) Dalam produk pangan, kemasan pintar yang baru dan canggih harus fokus pada aspek keamanan pangan agar dapat mendeteksi pertumbuhan mikroba, oksidasi, dan meningkatkan visibilitas kerusakan. Selain itu, teknologi baru ini juga harus meningkatkan masa simpan produk dan menawarkan kemampuan pelacakan, kenyamanan, dan keberlanjutan.
- d) Penanganan kemasan daur ulang dan limbah pangan dapat diatasi dengan mengembangkan sensor kemasan terintegrasi. Sensor ini dapat menyimpan informasi, misalnya, bahan pembuatan kemasan, tanggal kedaluwarsa pangan, tingkat oksigen, suhu dan tingkat pH, dan lain-lain. Informasi tersebut dapat dikomunikasikan kepada pemasok pangan, distributor, dan bahkan bisnis daur ulang kemasan melalui *Industrial Internet of Things*.
- e) Dari sudut pandang Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK), integrasi aktual kemasan pintar ke dalam jaringan produksi yang terintegrasi secara horizontal dan vertikal semakin banyak sebagai bagian dari *Industrial Internet of Things* dan *Internet of Services* mengharuskan sektor manufaktur untuk mengatasi sejumlah tantangan, termasuk integrasi Teknologi Informasi (TI) dan Teknologi Operasional (TO) internal mereka. Apa yang disebut konvergensi TI/TO ini adalah pendahulu untuk memungkinkan jaringan manufaktur pintar terdistribusi dan sebagian besar otonom di masa depan. Sejalan dengan itu, cara-cara baru untuk menangani keamanan siber dan memastikan keamanan data dan perlindungan IP di sepanjang siklus hidup adalah yang paling penting.

B. Peran Sistem Kemasan Pintar

1. Rantai Pasok Pangan

Secara umum, rantai pasok dapat dikonseptualisasikan secara luas sebagai interaksi antara berbagai pihak yang terlibat dalam aliran barang dan layanan ke konsumen akhir mereka. Munculnya manajemen rantai pasok sebagai suatu disiplin mengakui pergeseran dari bisnis individu ke jaringan yang lebih luas dengan penekanan pada manfaat yang dapat dibawa oleh kolaborasi jaringan yang luas. Kelemahan dari mengadopsi perspektif holistik yang lebih luas ini adalah bahwa hal itu, pada gilirannya, membuat pengelolaan dan pemahaman pihak semacam itu lebih kompleks daripada unit bisnis individual. Oleh karena itu, rantai pasok dapat dikonseptualisasikan sebagai sistem adaptif yang kompleks, ketika interaksi dan nonlinier di seluruh komponen lokal (seperti satu unit bisnis) dapat memengaruhi perilaku sistem secara keseluruhan.

Akibatnya, kegiatan rantai pasok dapat digambarkan ke dalam perspektif operasional, taktis, dan strategis, yang sering didefinisikan menurut ruang lingkup perencanaan temporal dan proses pengambilan keputusan yang dihasilkan. Agar rantai pasok menjadi kolaboratif—dan menuai manfaat dari model integratif holistik—sasaran dan metrik perlu diselaraskan di seluruh proses ini. Rantai pasok secara inheren menghadapi ketidakpastian dan dampak ketidakpastian yang menyebar ke berbagai unit jaringan pasokan, baik hulu ke pemasok maupun hilir ke konsumen. Oleh karena itu, dampak keterlambatan atau gangguan kecil dapat menyebabkan volatilitas rantai pasok yang meluas. Dengan demikian, manajer harus berada dalam posisi yang tepat untuk menilai dampak berbagai risiko pada operasi rantai pasok.

Meskipun literatur rantai pasok menawarkan wacana seputar strategi tertentu untuk menghadapi ketidakpastian, penerapannya terhadap rantai pasok pangan masih belum jelas. Misalnya, strategi umum persediaan pengaman—menyimpan barang tambahan untuk memenuhi fluktuasi permintaan tidak mudah dialihkan ke FSC karena

tantangan kerusakan produk. FSC unik karena, selain pertimbangan umum manajemen rantai pasok, sering kali harus berurusan dengan masalah seputar daya tahan dan kerusakan serta pemborosan produk. Produk dalam rantai ini dapat dinyatakan sebagai penurunan nilai dan kualitas setelah diproduksi. Oleh karena itu, jenis produk pangan tertentu (misalnya, produk segar) memiliki variabilitas dalam umur simpan marginalnya, atau “tingkat ketika produk kehilangan nilai dari waktu ke waktu dalam rantai pasok” seperti yang dijelaskan oleh Blackburn dan Scudder (2009). Mengingat ini kembali ke gagasan volatilitas rantai pasok, masalah, seperti penundaan stok dan peningkatan inventaris, dapat menyebabkan pemborosan yang meluas untuk produk yang mudah rusak. Pemicu kerusakan produk dalam FSC bervariasi. Namun, mereka sering dapat dikategorikan menjadi dua kategori yang berbeda: faktor temporal dan lingkungan. Produk perlu melakukan perjalanan hilir dalam FSC seefektif mungkin karena produk dalam FSC tunduk pada nilai marginal waktu.

Elemen lingkungan termasuk suhu dan kelembapan memengaruhi kualitas pangan dan menjadi risiko kerusakan produk. Dampak kerusakan produk dalam FSC ada dua; pertama, meskipun penurunan kualitas karena produk pangan memburuk, tetapi juga peningkatan risiko barang terkontaminasi yang berdampak pada keamanan pangan. Selain tantangan seputar kerusakan produk, FSC juga menghadapi tantangan terkait peningkatan regulasi dan tekanan lingkungan. Tekanan regulasi yang meningkat menghasilkan strategi FSC tertentu, misalnya, keterlaksanaan, menjadi komponen wajib untuk beroperasi di wilayah tertentu. Menambah kompleksitas menunjukkan bahwa peraturan tidak universal dan kadang-kadang ditegakkan secara selektif serta menambah tantangan ekstra untuk FSC yang beroperasi melintasi perbatasan internasional. Selain itu, tekanan lingkungan mendikte kebutuhan untuk memastikan komponen FSC (seperti pengemasan) mengatasi berbagai masalah keberlanjutan, yaitu pengurangan limbah dan daur ulang pengemasan. Isu-isu keberlanjutan ini berdampak pada FSC tidak hanya melalui dampak lingkungan, tetapi juga kekhawatiran pemangku kepentingan

(terutama masyarakat) yang memengaruhi program tanggung jawab sosial perusahaan.

Masalah terakhir yang berdampak pada kinerja FSC adalah pemborosan. Meskipun menghilangkan pemborosan adalah masalah umum dalam rantai pasok apa pun, terutama yang menerapkan filosofi *lean*, pemborosan pangan sering kali sulit diukur di seluruh FSC dan menembus semua aktor dalam jaringan pasokan. Penyebab limbah pangan bervariasi, tetapi pemborosan terutama terjadi pada akhir rantai pasok karena produk akhir dapat rusak atau memburuk selama tahap ini. Meskipun pengemasan sering dikaitkan dengan limbah dalam rantai pasok komersial, dalam konteks FSC, teknik pengemasan yang ditingkatkan telah dianggap sebagai alat untuk mengurangi limbah pangan karena bermanfaat mengurangi kerusakan produk.

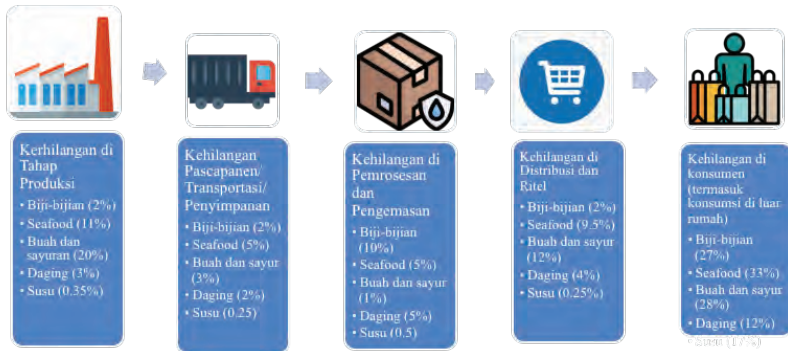
2. Kehilangan Pangan dan Limbah Pangan

Kehilangan dan limbah pangan telah menjadi masalah dan menarik perhatian besar dengan pertumbuhan penduduk dunia semakin tinggi. Dilaporkan bahwa sekitar 30% dari pasokan pangan global dan 40% dari pasokan pangan seperti di Amerika Serikat hilang atau terbuang setiap tahun (Hall dkk., 2009). Menurut FAO (2011), 1,3 miliar ton produk pangan hilang atau terbuang per tahun dan kehilangan atau pemborosan ini dapat terjadi pada setiap langkah di seluruh rantai pasok mulai dari lahan hingga meja makan. Keberlanjutan global, lingkungan dan kesehatan manusia, serta sumber daya alam dapat dipengaruhi oleh terbuangnya pangan. Sebagai bagian dari Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB), Perserikatan Bangsa-Bangsa bertujuan untuk “mengurangi 50% limbah pangan global di tingkat ritel dan konsumen dan mengurangi kehilangan pangan pascapanen pada tahun 2030” (PBB, 2018).

Gambar 8.1 menunjukkan kemungkinan kehilangan/limbah yang dihasilkan pada tahapan FSC yang berbeda untuk beberapa produk pangan yang representatif, misalnya, pada tahap konsumsi akhir, perilaku konsumen memiliki dampak yang signifikan terhadap timbulnya sampah pangan. Banyak orang suka mengambil porsi yang terlalu

besar, tetapi akhirnya membuang sisa makanan. Namun, jarang di antara mereka yang menyadari dampak negatif limbah pangan terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Kontaminasi dan kerusakan akibat kontrol keamanan yang tidak memadai, penimbunan produk yang berlebihan di toko/rumah, pelabelan yang tidak tepat, dan informasi produk yang hilang adalah beberapa penyebab penting hilang dan terbuangnya pangan di sepanjang rantai pasok. Produk roti dan pangan yang mudah rusak berkontribusi pada sebagian besar limbah pangan yang secara berurutan berdampak pada semua bagian lain dalam rantai pasok (Mena dkk., 2011). Alasan utama untuk masalah ini biasanya adalah kuantitas surplus yang melebihi permintaan, masa simpan produk yang lebih pendek, atau kondisi penyimpanan yang buruk. Selain itu, perlu dicatat bahwa penyebab yang mendasari hilang dan terbuangnya pangan dapat bervariasi antara negara maju dan negara berkembang. Misalnya, sekitar 40% kehilangan pangan terjadi selama tahap produksi di negara berkembang, sementara 40% dari sisa pangan dihasilkan selama tahap distribusi, pemasaran, dan konsumsi di negara maju (Wunderlich & Martinez, 2018). Kehilangan/pemborosan pangan juga bersinggungan dengan masalah kesehatan masyarakat dalam hal ketahanan pangan, keamanan pangan, dan gizi, hingga berdampak negatif terhadap perkembangan kondisi sosial ekonomi. Misalnya, konsekuensi sosial ekonomi dari limbah pangan dapat mengakibatkan harga pangan yang lebih tinggi, pendapatan yang lebih rendah, dan kemiskinan yang lebih buruk. Selain itu, praktik pemborosan dapat menyebabkan kerusakan tanah, air tawar, lautan, hutan, dan keanekaragaman hayati.

Strategi dan teknologi mutakhir yang berbeda perlu diusulkan berdasarkan kondisi spesifik yang sesuai untuk latar belakang lokal, regional, dan global. Selain itu, sangat penting bahwa metode yang digabungkan harus unik dengan mempertimbangkan keterbatasan energi dan infrastruktur, kehilangan pangan yang ditargetkan di negara berkembang, dan sisa pangan di negara maju. Namun, untuk menerapkan strategi tersebut, beberapa tindakan harus diambil oleh

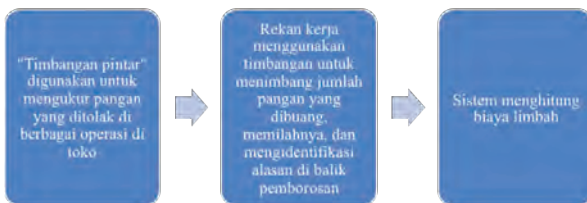


Sumber: FAO (2011)

Gambar 8.2 Kehilangan Pangan di Setiap Tahap Rantai Pasok (Gabungan AS, Kanada, Australia, dan Selandia Baru)

berbagai pemangku kepentingan (misalnya donor, lembaga pemerintah, dan sektor swasta) atas tantangan yang mereka hadapi.

Di sisi lain, upaya juga telah dilakukan untuk menghasilkan energi dari limbah pangan menggunakan teknologi yang beragam seperti pencernaan anaerobik, fermentasi etanol, insinerasi, pirolisis, gasifikasi, dan karbonisasi hidrotermal. Limbah pangan yang dihasilkan juga telah dianggap sebagai sumber alami senyawa bernilai tambah tinggi dengan sifat antioksidan. Selain itu, organisasi internasional, seperti FAO, World Food Programme (WFP), dan United Nations Environment Programme (UNEP), telah melakukan upaya yang



Sumber: Food Loss and Waste Protocol (FLW Protocol) (2017)

Gambar 8.3 Strategi IKEA yang digunakan dalam Inisiatif Limbah Pangan “Food is Precious”.

signifikan untuk meningkatkan kesadaran publik akan keamanan pangan untuk mencapai tujuan “*zero loss or waste of food*” dalam visi “*Zero Hunger Challenge*”. World Resource Institute (WRI) juga telah mengembangkan *food loss* dan protokol untuk mengatasi tantangan yang harus dihadapi untuk mengukur kehilangan dan pemborosan pangan di seluruh dunia (PWC, 2018). Dalam satu studi kasus IKEA (*Ingvar Kamprad Elmtaryd Agunnaryd*), mereka menggambarkan strategi sederhana untuk mengidentifikasi faktor umum di balik limbah pangan dan selanjutnya memberikan solusi untuk memerangi masalah limbah pangan (Gambar 8.2).

3. Kemasan Pintar dan Dampaknya dalam Mengurangi Kehilangan dan Limbah Pangan

Istilah “kemasan pintar” sering digunakan secara bergantian atau disalahartikan untuk membahas sistem pengemasan. Kemasan pintar dianggap sebagai konsep yang luas, yang mencakup kemasan cerdas dan aktif yang dapat memantau perubahan internal dan eksternal yang terjadi pada suatu produk (cerdas) dan merespons lebih lanjut (aktif) dengan berkomunikasi dengan antarmuka eksternal (listrik atau optik). Tujuan akhir penerapan kemasan cerdas adalah untuk memperpanjang masa simpan produk dan menjaga kesegarannya, bertukar informasi berkualitas dengan konsumen, meningkatkan keamanan produk, dan meningkatkan ketertelusuran produk saat bergerak melintasi rantai pasok. Kemasan aktif yang menjadi alternatif utama kemasan tradisional bertujuan untuk mendukung dan mempertahankan kualitas tinggi serta untuk memperpanjang kesegaran produk pangan. Untuk mewujudkan itu, berbagai komponen dapat dimasukkan ke dalam sistem yang mampu melepaskan/menyerap zat dari/ke dalam pangan kemasan untuk menghindari pembusukan. Sebagai perbandingan, kemasan pintar terutama digunakan untuk melacak dan memantau kondisi pangan kemasan serta untuk menangkap dan menyediakan data kondisi produk selama proses penyimpanan dan transportasi. Dengan demikian, sistem pengemasan pintar biasanya melibatkan elemen perangkat keras, misalnya detek-

tor gas, indikator kesegaran dan pematangan, indikator waktu-suhu/ *temperature-time indicator* (TTI), dan perangkat identifikasi frekuensi radio (RFID). Ada juga sistem “pembawa data” yang dapat digunakan untuk penyimpanan dan transfer data untuk menampilkan informasi setelahnya.

Kemajuan teknologi terkait dengan isu keamanan pangan merupakan salah satu langkah utama dalam mencegah kehilangan dan pemborosan pangan. Beberapa di antaranya termasuk sistem penyimpanan yang dikontrol suhu dan hemat energi, bahan dan desain kemasan baru, serta sistem pemantauan pintar. Khususnya teknik pengemasan canggih, termasuk pengemasan aktif dan kemasan cerdas, telah terbukti menjadi alat penting untuk mengurangi limbah pangan dengan menjamin keamanan pangan dan memenuhi harapan konsumen. Meskipun perangkat elektronik untuk kemasan pintar telah dikembangkan secara signifikan, seperti sensor elektrokimia, *E-Tongues*, dan *E-Noses*, perangkat saat ini biasanya rumit dan mahal serta belum siap untuk diintegrasikan dengan kemasan nyata. Saat ini, keterangan “baik digunakan sebelum” dan “dijual oleh” atau “digunakan oleh” telah menjadi norma dalam industri pangan, tetapi gagal memberikan informasi tentang keadaan pangan di dalam kemasan. Dengan demikian, “sistem masa simpan dinamis” harus diperkenalkan untuk interpretasi sederhana. Dalam aspek ini, kinerja lingkungan dari bahan kemasan menjadi perhatian. Oleh karena itu, penelitian tentang pemetaan penilaian kinerja kemasan terhadap lingkungan sangat penting untuk memberikan panduan kepada para ahli desain kemasan.

Ada kebutuhan mendesak akan teknologi baru untuk menjamin ketahanan pangan. Aplikasi teknologi canggih dalam sistem kemasan pintar muncul dan baru-baru ini diadopsi oleh industri farmasi dan pangan tidak hanya untuk melengkapi fungsi pengemasan konvensional, tetapi juga sebagai alat atau solusi untuk memperpanjang umur simpan produk pangan, sehingga nyaman untuk proses produksi, meminimalkan kehilangan dan pemborosan pangan, memberantas bahan pengawet, dan yang terpenting menyediakan kualitas dan

variasi yang tinggi untuk memastikan keamanan dan kepuasan konsumen. Menargetkan secara spesifik penanda kimia atau biologis dalam pangan masih menjadi tantangan utama dalam mengembangkan sistem pengemasan canggih untuk produk pangan. Keputusan untuk memilih penanda target tergantung pada pengetahuan awal untuk agen mikroba yang relevan dan kemunculannya dalam berbagai kondisi di berbagai jenis produk pangan serta pelepasan zat reaksi yang dihasilkan selama proses pembusukan.

Pembusukan pangan adalah proses kompleks yang dapat dimulai oleh serangkaian tindakan fisik, kimia atau enzimatik, dan mikrobiologis. Pertumbuhan dan metabolisme bakteri dapat menyebabkan perubahan pH dan menghasilkan zat beracun, bau tak sedap, gas, serta pembentukan lendir. Proses kimia, seperti oksidasi, iradiasi, dan lipolisis, dapat menyebabkan rasa yang tidak diinginkan dan pembentukan efek samping. Selain parameter intrinsik (fisikokimia dan struktural), faktor ekstrinsik (suhu, pH, dan kelembapan) juga dapat memengaruhi pembusukan pangan secara kimia, fisik, dan biologis. Ada banyak teknologi untuk mengurangi pembusukan pangan, seperti indikator integritas, indikator pembusukan pangan, indikator kematangan, indikator ketengikan, indikator kematangan microwave, dan RFID.

Tag RFID pintar bertujuan untuk mengevaluasi kualitas produk yang disimpan berdasarkan integrasi elemen penginderaan. *Tag* RFID *sensorenable* ini dapat mendeteksi perubahan sifat pangan, seperti pH, konduktivitas, konstanta dielektrik, viskositas, volatil pangan, dan gas, melalui elemen kimia seperti lapisan responsif, label optik, kertas lakmus, dan pH atau elektroda konduktivitas. Beberapa contohnya termasuk menerapkan film responsif volatil pangan yang berbeda pada struktur RF dan mendeteksi perubahan respons melalui perubahan warna pewarna tertentu yang disebabkan oleh volatil dari pangan atau karena perubahan pH pangan untuk penginderaan kolorimetri serta memantau variasi konstanta dielektrik pangan karena rusak (Potyrailo dkk., 2014). Senyawa volatil dikeluarkan oleh pangan sebagai produk sampingan degradasi. Molekul, seperti dimetilamina, trimetilamina,

amonia, histamin, karbon, senyawa sulfat, dan etanol, adalah beberapa produk sampingan metabolisme bakteri yang dapat digunakan sebagai indikator pembusukan pangan (Bibi dkk., 2017). Mikroekstraksi fase padat dikombinasikan dengan kromatografi gas-spektrometri massa, spektroskopi UV-VIS, dan *near-infrared spectroscopy* telah digunakan untuk mengidentifikasi dan mengukur senyawa volatil dalam pangan. Namun, sebagian besar teknik ini mahal, rumit, dan padat karya bila dibandingkan dengan RFID yang diaktifkan sensor pintar dan telah dianggap sebagai teknik yang hemat biaya, tidak mengganggu, dan ramah pengguna untuk pengemasan pangan. Selain itu, sistem pengemasan ini dapat menjadi alat yang ampuh untuk mengurangi limbah pangan karena memiliki indikator yang dapat berinteraksi dengan bahan pangan dan metabolit di faktor lingkungan ekstrinsik sehingga memungkinkan pemantauan kondisi produk pangan.

Kemosensor kromogenik adalah sistem sekali pakai yang mudah digunakan, tidak hanya karena lebih murah, serbaguna, dan mudah dicetak pada kemasan, tetapi juga karena perubahan warnanya seiring waktu dapat dengan mudah dideteksi melalui film transparan dengan mata telanjang. Keterbatasan sensor ini adalah kurangnya spesifisitas (Poyatos-Racionero dkk., 2018). TTI menawarkan ringkasan visual profil suhu produk dengan merekam efek waktu dan suhu. Berbagai jenis TTI telah dikembangkan sesuai dengan mekanisme kerja (jenis kimia, enzimatis, mikrobiologis, dan mekanis), tetapi sebagian besar TTI gagal memberikan perubahan biokimia yang terjadi pada pangan. Misalnya, Rokugawa dan Fujikawa (2015) mengembangkan integrator waktu-suhu pada tahun 2015 berdasarkan reaksi Maillard. Integrator tersebut mampu memantau dan mengatur suhu pangan antara 4 dan 32°C. Perubahan warna diamati sebagai akibat dari waktu dan suhu dan konstanta laju perubahan warna yang dinyatakan oleh model Arrhenius. Mereka menegaskan kemampuan sensor ini sebagai indikasi pertumbuhan mikroorganisme pangan pada suhu yang berbeda. Kulchan dkk. (2016) mengembangkan indikator kolorimetri untuk merekam reaksi ketengikan susu bubuk instan yang sensitif terhadap oksigen. Label indikator berisi kombinasi dua zat yang peka

terhadap pH, pewarna biru bromotimol dan merah metil, yang dapat merespons senyawa volatil yang dilepaskan karena oksidasi selama penyimpanan. Bromotimol biru bergeser dari basa menjadi asam dengan perubahan warna dari biru menjadi kuning dan perubahan pH berturut-turut dari 7,6 menjadi 5,8. Adapun untuk metil merah, pH turun dari 6,2 menjadi 4,5 dengan perubahan warna dari kuning menjadi merah. Perubahan warna dari hijau muda ke oranye bisa menjadi sinyal peringatan.

Menurut laporan dari Boston Consulting Group (BCG) tahun lalu, ada kemajuan yang lambat dalam menghilangkan pemborosan pangan melalui seluruh rantai pasok karena infrastruktur yang tidak memadai, kurangnya upaya, peraturan, dan kolaborasi di seluruh rantai nilai. Diproyeksikan bahwa peningkatan infrastruktur dan efisiensi rantai pasok saja dapat mengurangi kehilangan pangan sebesar US\$270 miliar (dalam nilai) setara dengan US\$1,5 triliun pada tahun 2050. Dalam hal ini, sistem kemasan pintar dapat memainkan peran penting dengan meminimalkan limbah pangan dan memungkinkan pengelolaan rantai pasok yang lebih berkelanjutan. Misalnya, pembawa data akan membantu menghubungkan informasi dalam rantai pasok untuk membuat proses lebih efisien dengan memastikan keterlacakan, otomatisasi, pencurian, atau perlindungan pemalsuan. RFID akan memberikan lebih banyak keuntungan bagi keseluruhan rantai pasok dengan mendukung manajemen inventaris dan keterelusuran sehingga meningkatkan kualitas dan keamanan pangan. Demikian pula, TTI akan membantu memantau profil suhu yang tepat atau rantai dingin di seluruh rantai pasok. Dengan demikian, kemasan pintar tidak hanya akan mengurangi limbah dan kehilangan pangan melalui peningkatan efisiensi distribusi dalam rantai pasok dan mendeteksi pembusukan pangan secara efektif, tetapi juga mengatasi masalah keamanan pangan. Selain itu, tidak hanya waktu dan biaya bahan untuk analisis pangan kemasan yang diminimalkan, tetapi pengurangan biaya juga akan terjadi ketika kemasan pintar menghilangkan sisa pangan. Diharapkan kemasan pintar bioaktif baru dapat menjadi tren masa depan yang berpotensi membuka

cakupan baru, meningkatkan permintaan pasar, dan diadopsi oleh lebih banyak industri pangan. Selain itu, perbaikan terus-menerus dalam pengumpulan data limbah pangan sangat diharapkan untuk berkontribusi pada pengambilan keputusan serta promosi desain kemasan ini. Selain itu, teknologi manufaktur canggih diperlukan untuk memangkas biaya produksi massal dan mengurangi kerumitan integrasi perangkat pintar ke dalam lini pengemasan saat ini. Penyelidikan lebih lanjut perlu dilakukan pada masalah keamanan dan kelayakan dan kemungkinan untuk dimasukkan ke dalam berbagai aplikasi. Terakhir, konsumen harus mendapat informasi yang baik tentang sistem pengemasan canggih, biaya dan manfaat, serta yang lebih penting kesediaan mereka untuk berbelanja.

4. Teknologi dan Biaya Manufaktur untuk Kemasan Cerdas

Seperti dibahas sebelumnya, kemasan cerdas memainkan peran penting dalam FSC, dengan meningkatkan efisiensi distribusi untuk mengurangi limbah dan kehilangan pangan, mendeteksi pembusukan pangan untuk mengatasi masalah keamanan, dan sebagai hasilnya, menghemat waktu dan biaya. Namun, ada *trade-off* antara biaya potensial yang terkait dengan limbah dan kehilangan pangan serta masalah keamanan (tanpa kemasan pintar) dan biaya tambahan untuk mengadopsi paket pintar, yaitu biaya produksi kemasan pintar. Sensor atau label pintar adalah elemen kunci dalam sistem SP untuk memantau kualitas pangan, kondisi penyimpanan, atau untuk menentukan lingkungan luar produk yang dikemas (baik untuk kebutuhan produsen dan konsumen) (Jiang dkk., 2014; Neethirajan & Jayas, 2011; Wyser dkk., 2016). Teknik yang sesuai untuk membuat elemen cerdas yang kompatibel dengan standar pengemasan saat ini perlu dikembangkan dan ditingkatkan untuk mengurangi biaya produksi terkait, tetapi pada saat yang sama juga memperluas jangkauan aplikasinya untuk berbagai produk pangan. Di antara teknik manufaktur yang ada, metode elektronik yang dapat dicetak telah mendapat perhatian yang signifikan tidak hanya dari akademisi, tetapi juga dari komu-

nitias manufaktur industri karena kemampuan hebat mereka untuk menyimpan elektronik secara langsung (misalnya, sensor, baterai, tag RFID) pada substrat fleksibel (misalnya, polimida, polietilen tereftalat, polieter eter keton, elastomer, dan bahkan kertas) dengan cara yang hemat biaya, dalam skala besar dan efisien, bersama dengan properti lain seperti bobot yang ringan, portabilitas, kelenturan, kemampuan lipat, dan area aktif yang besar. Dalam dekade terakhir, produsen secara bertahap menggunakan metode pencetakan untuk memproduksi beberapa perangkat elektronik konvensional untuk mengurangi biaya. Misalnya, Thin Film Electronics ASA telah berhasil mendemonstrasikan sistem sensor pelacak suhu bertenaga baterai yang dapat dicetak yang cocok untuk memantau pangan segar. Xerox mengusulkan label cetak yang sangat aman (Xerox Printed Memory) yang dapat digunakan untuk memeriksa apakah suatu produk asli dan dapat melacak penanganan produk selama distribusi (Xerox, 2015). Untuk pemahaman yang lebih baik tentang posisi fabrikasi elektronik yang dapat dicetak dalam rantai pasok, kita akan membahas secara singkat berbagai teknik pencetakan dengan kelebihan, kelemahan, dan biaya keseluruhan, yang akan membantu dalam pengambilan keputusan kemasan pintar pada tahap awal FSC.

Ada beberapa metode pencetakan yang biasa digunakan dalam fabrikasi elektronik yang dapat dicetak: *gravure*, *flexography*, *screen*, *inkjet*, dan *aerosol jet printings* (AJPs). Dalam hal pencetakan *gravure*, desain harus dicap atau dimuat pada *roller* silinder dan tekanan digunakan untuk mentransfer tinta secara langsung ke gulungan media. Metode ini dianggap dapat menghasilkan label pintar berbiaya rendah dengan kecepatan produksi yang tinggi. Misalnya, pencetakan *gravure roll-to-roll* (R2R) telah digunakan untuk membuat label kemasan cerdas (Jung dkk., 2014). Hal ini juga memiliki skalabilitas yang sangat baik dan resolusi yang kompetitif. Jenis cetakan ini cocok untuk produksi massal jika dipadukan dengan konfigurasi pencetakan R2R. *Flexography*, teknik yang biasanya dibandingkan dengan *rotogravure*, terutama digunakan untuk aplikasi pengemasan yang sebagian besar untuk pembuatan perangkat elektronik dengan

kemampuan pencetakan berkecepatan tinggi, kemasan pintar, dan RFID. Pelat cetak terdiri dari bahan yang lebih lembut dan unit cetak memiliki suplai tinta, rol anilox, silinder pelat, dan silinder cetak. Hal ini dapat digunakan pada hampir semua bahan yang tidak menyerap.

Pembawa gambar *gravure* biasanya jauh lebih mahal daripada *flexography*, tetapi memiliki waktu tekan yang lebih lama. Menurut data dari CI-Flexo-Tech, biaya rata-rata pelat *flexographic* adalah sekitar US\$0,03–0,045 per sentimeter persegi. Seperti pencetakan *inkjet*, sablon menghasilkan lapisan tebal dan berpola dari bahan yang sangat kental sehingga mempertahankan *throughput* dan resolusi tinggi. Sablon cocok untuk bahan anorganik dan organik dengan viskositas berbeda meskipun fungsi lapisan atau fleksibilitas substrat. Sablon dan persyaratannya untuk komposisi tinta cetak dengan nanopartikel juga dipelajari dan didiskusikan untuk kemasan pintar. Sedangkan untuk pencetakan *inkjet*, tetesan tinta disuntikkan dari nosel ke substrat yang kaku atau fleksibel. Pencetakan *inkjet* mencapai keseimbangan antara resolusi pencetakan dan skalabilitas serta tanpa menggunakan *mask* apa pun dapat digunakan untuk mengembangkan pola yang relatif detail. Dibandingkan dengan teknik pencetakan lainnya, pencetakan *inkjet* memiliki produksi limbah yang rendah (hampir nol) dan biaya awal yang lebih rendah. Namun, tinta yang sangat kental dan partikel dengan rasio aspek tinggi, misalnya, dielektrik organik dan karbon nanotube (CNT), tidak dapat dengan mudah dikelola dengan pencetakan *inkjet* karena penyumbatan nosel. Pencetakan *inkjet* telah digunakan untuk mencetak, pada saat yang sama dengan pengemasan, beberapa informasi tentang pembuatan produk dan tanggal kedaluwarsa.

Selanjutnya, sebagai elemen yang menjanjikan untuk kemasan pintar, *tag* RFID dapat dibuat dengan metode *inkjet*. Dibandingkan dengan *tag* RFID melalui teknologi semikonduktor silikon, RFID yang dicetak diharapkan lebih murah dengan menggunakan polimer konduktif, tinta logam, dan bahkan CNT. Selain itu, metode pencetakan akan memfasilitasi kombinasi *tag* RFID dengan fungsi penginderaan kimia seperti penginderaan etilen dan kelembapan. Pendekatan baru

lainnya adalah AJP dengan presisi pencetakan sekitar 10 m. Berbagai solusi, termasuk solusi CNT rasio aspek tinggi serta tinta organik dan anorganik dengan viskositas tinggi, dapat digunakan melalui AJP untuk menghasilkan ketebalan lapisan mulai dari puluhan nanometer hingga beberapa mikrometer. Keunggulannya terletak pada kemampuannya yang unik untuk mencetak pola pada permukaan yang tidak rata (3D). Pencetakan *inkjet* adalah pendekatan pencetakan yang lebih murah jika dibandingkan dengan teknik baru ini, AJP (printer AJP industri berharga sekitar US\$500 ribu). Kesimpulannya, untuk fabrikasi volume tinggi, teknik R2R yang ideal, sedangkan untuk resolusi pencetakan superior, teknik lain, seperti pencetakan *inkjet*, sablon, dan AJP, lebih dipilih. Tabel 8.1 merangkum perbandingan antara berbagai teknik yang sesuai sehingga dapat digunakan untuk membuat sistem kemasan pintar.

Tabel 8.1 Perbandingan Metode Fabrikasi Pencetakan Utama untuk Sistem Pengemasan Cerdas

Metode Pencetakan	Viskositas (Pas)	Ketebalan lapisan (μm)	Ukuran fitur (μm)	Registrasi (μm)	Throughput (m^2/s)	Referensi
Pencetakan gravure	0,01 hingga 0,2	<0,1 hingga 8	75	< 20	3 hingga 60	(Grau dkk., 2016)
Pencetakan flexografi	0,05 hingga 0,5	0,04 hingga 2,5	80	< 200	3 hingga 30	(Maksud dkk., 2012)
Sablon	0,5 hingga 50	0,015 hingga 100	20 hingga 100	>25	2 hingga 3	(Khan dkk., 2015)
Pencetakan inkjet	0,001 hingga 0,04	0,05 hingga 20	20 hingga 50	5 hingga 20	0,01 hingga 0,5	(Secor dkk., 2013)
Pencetakan jet aerosol	0,001 hingga 2,5	0,1 hingga 5	10 hingga 200	5	0,01 hingga 0,5	(Cao dkk., 2017)

Meskipun elektronik fleksibel tercetak memiliki prospek cerah untuk aplikasi kemasan pintar dan proses manufaktur mutakhir telah memungkinkan produksi massal elektronik cetak tertentu, masih ada beberapa poin penting yang harus ditekankan dan masalah harus

ditangani selama keseluruhan FSC. Ketika digunakan dalam kemasan pangan, kemasan pintar terutama berfokus pada pendeteksian patogen dan kontaminan menggunakan sensor/indikator. Elemen ini pertama-tama harus dapat diintegrasikan ke dalam kemasan, memberikan umpan balik yang jelas dan mudah dikenali (misalnya, perubahan warna), serta biaya pembuatannya rendah. Bahan yang digunakan untuk elemen cerdas harus dapat dicetak, berbiaya rendah, ramah pengguna dan lingkungan, tepat, mudah dikelola, serta dapat direproduksi. Dalam aspek ini, banyak nanomaterial telah diterapkan secara intensif untuk pencetakan aplikasi kemasan cerdas. Strategi yang paling nyaman mungkin pertama-tama mencetak label kemasan *gravure* kemudian menempelkannya pada permukaan kemasan. Label dengan sensor atau indikator ini masuk akal dan akan bereaksi terhadap perubahan yang disebabkan oleh pembusukan, pencairan es, dan sebagainya. Reaksi ini bisa dengan mengubah karakteristik optik, mekanik, atau listriknya. Selain itu, kinerja elektronik cetak yang lebih rendah dapat menghambat aplikasi praktisnya secara lebih lanjut dengan masalah terkait: (1) bagaimana menentukan reseptor optimal atau formulasi tinta elektronik dengan sensitivitas dan selektivitas tinggi; (2) bagaimana meningkatkan ketahanan elektronik dan meminimalkan konsumsi daya; (3) bagaimana mengurangi variasi dalam proses produksi dengan mengoptimalkan parameter pencetakan dan karakteristik material; dan (4) bagaimana cara mengintegrasikan *tag* RFID pintar secara efektif. Lebih lanjut, perlu diperhatikan bahwa keunggulan kemasan pintar saat ini masih belum terpasarkan dengan baik sehingga menjadi penghambat penetrasi pasar perangkat cerdas. Pengecer mengkhawatirkan penurunan penjualan mereka yang disebabkan oleh peringatan dan pesan yang diberikan oleh kemasan pintar yang dapat memengaruhi keputusan konsumen untuk hanya membeli barang yang baru dipajang. Di sisi lain, konsumen tidak yakin dengan keakuratan dan kualitas informasi tentang produk yang disediakan oleh kemasan pintar (Vanderroost dkk., 2014). Selain itu, strategi pemasaran juga kurang efektif untuk memaksimalkan dampak kemasan cerdas. Upaya signifikan dari akademisi dan industri diperlukan untuk mendorong penerapan kemasan cerdas dalam rantai pasok.

C. Kemasan Pangan dan Nanoteknologi: Menjaga Kesehatan dan Keselamatan Konsumen

Dalam beberapa tahun terakhir, industri pangan telah mengalami perubahan dan pertumbuhan yang luar biasa dari kemasan pasif ke kemasan inovatif untuk memenuhi tren global, kemajuan teknologi, dan preferensi konsumen sebagai akibat dari peningkatan aplikasi nanoteknologi. Melalui studi aktif dan inovatif dalam kemasan pangan, paket inovatif seperti kemasan pangan cerdas dan kemasan aktif sedang dikembangkan untuk kemasan yang lebih efektif dan efisien terkait isu lingkungan.

Pangan adalah suatu biosistem dan zat yang dapat dimakan dan berasal dari tumbuhan atau hewan yang memiliki zat gizi esensial yang membantu pertumbuhan, memberi energi untuk aktivitas manusia, serta menopang kehidupan. Kondisi ini menuntut pangan harus ditangani dengan sangat hati-hati untuk menghindari kontaminasi pangan dan konsekuensi dari menelan pangan yang terkontaminasi. Kualitas pangan dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor sebagai akibat dari kontaminasi. Kontaminasi pangan dapat terjadi di setiap titik rantai pangan dari lokasi produksi hingga konsumsi akhir di meja konsumen. Pencemaran tersebut dapat bersifat fisik, kimia, atau biologis yang dapat memengaruhi keutuhan bahan pangan untuk dikonsumsi manusia.

Nanoteknologi melibatkan studi dan manipulasi materi di tingkat skala atom dan molekul. Ini adalah bidang yang muncul pada pengendalian materi pada skala atom dan molekul dengan setidaknya satu dimensi karakteristik diukur dalam nanometer. Skala nano dalam kisaran 1 sampai 100 nm dalam skala yang umum digunakan mendefinisikan nanopartikel sebagai unit kecil dari objek yang bekerja dan tampil sebagai unit keseluruhan dalam hal transportasi dan properti. Menurut Chellaram dkk. (2014), bahan nano diklasifikasikan dan disusun berdasarkan karakteristik, ukuran, dan strukturnya.

Bahan yang digunakan dalam pangan kemasan nano adalah termasuk partikel nano, serat nano, dan pelat nano. Di sisi lain, nano-komposit adalah polimer aditif anorganik yang telah terintegrasi bersama untuk membentuk satu kesatuan. Nanoteknologi memiliki beberapa aplikasi. Kegunaannya telah dieksplorasi dalam pengembangan bahan pangan, pengolahan dan pengawetan pangan, bahan habis pakai biomedis, pembuatan tekstil, perawatan medis dan kesehatan, pembuatan kertas, produksi bahan kimia pertanian, serta di bidang kedokteran hewan sebagai beberapa kegunaan.

Nanoteknologi telah diterima oleh berbagai organisasi dan penggunaannya dalam kemasan pangan merupakan bidang penelitian yang baru muncul. Penggunaan teknologi nano telah mendorong penerapan kemasan aktif untuk mengurangi atau menghambat pertumbuhan mikroba setelah kemasan dibuka oleh konsumen dan dibungkus ulang. Nanoteknologi sekarang digunakan untuk mendeteksi bakteri dan patogen lain dalam pangan kemasan atau digunakan untuk meningkatkan keamanan dan sifat penghalang pangan kemasan. Namun, tindakan pencegahan yang memadai diperlukan dalam penggunaan nanoteknologi karena hanya sedikit pengetahuan yang tersedia saat ini dan penelitian sedang berlangsung tentang dampaknya terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Pal, 2017).

Nanoteknologi karena keserbagunaannya dapat memperbaiki kehidupan manusia dan dapat menjadi jalan untuk meningkatkan kesehatan, kekayaan, produksi, dan kualitas hidup manusia. Pangan kemasan nano adalah bidang yang masih belum dijelajahi dan upaya perlu diarahkan pada penggunaan nanoteknologi untuk meningkatkan kehidupan manusia.

1. Aplikasi Nanoteknologi dalam Kemasan Pangan

Teknologi nano telah diketahui memiliki beberapa aplikasi dalam kemasan pangan. Beberapa bahan nano seperti nanopartikel perak, nanopartikel titanium nitrida, dan nano-titanium dioksida, nano-seng oksida, dan nano-tanah liat digunakan dan telah menjadi aplikasi

aditif fungsional untuk kemasan pangan. Nanoteknologi dapat digunakan dalam kemasan pangan untuk tujuan berikut.

a. Pengemasan yang Lebih Baik

Hal ini dicapai dengan mencampur bahan nano ke dalam matriks polimer bahan pengemas untuk meningkatkan sifat penghalang gas serta ketahanan suhu dan kelembapan bahan pengemas untuk aplikasi pangan. Ini termasuk penggunaan nano-komposit dalam kontak dengan pangan yang telah disetujui dan disertifikasi aman oleh otoritas terkait, seperti Food and Drug Administration di Amerika Serikat.

b. Kemasan Aktif

Hal ini melibatkan penggunaan bahan nano untuk berinteraksi langsung dengan pangan atau lingkungan untuk memungkinkan perlindungan produk yang lebih baik dari dampak atau pengaruh lingkungan. Sebagai contoh, nanopartikel perak dan pelapis perak dapat digunakan untuk memberikan sifat anti-mikrob dengan bahan lain yang berfungsi sebagai pemulung oksigen atau ultra-violet.

c. Kemasan Cerdas

Hal ini dapat melibatkan penggunaan kemasan untuk merasakan perubahan komponen biokimia atau mikrob dalam pangan, seperti mendeteksi patogen spesifik yang berkembang dalam pangan atau pembentukan gas tertentu dalam pangan yang dapat mengakibatkan pembusukan pangan. Beberapa kemasan “cerdas” juga telah dikembangkan untuk digunakan sebagai alat pelacak keamanan pangan atau untuk menghindari pemalsuan dalam pangan olahan. Beberapa produsen pangan seperti Nestle, Cadbury, dan MonoPrix Super market saat ini menggunakan sensor kimia untuk mendeteksi perubahan warna pada pangan.

Namun, bahan nano yang akan digunakan dalam kemasan pangan tergantung pada jenis produk yang akan dikemas dan diawetkan; persyaratan yang diperlukan dapat mencakup fitur seperti sifat mekanik, termal, dan penghalang. Selanjutnya, sifat fungsional bahan

nano telah meningkatkan penggunaannya dalam kemasan pangan. Pengemasan nano telah meningkatkan aplikasi dalam merancang paket yang dapat melepaskan antimikrob, antioksidan, enzim, dan rasa untuk meningkatkan umur simpan produk pangan.

Nanoteknologi dapat bermanfaat dalam teknologi pengemasan pangan dalam waktu dekat. Menurut Dasgupta dkk. (2015), “aplikasi nanoteknologi dalam pengolahan dan pengemasan pangan adalah salah satu bidang yang muncul dan paling cepat berkembang dalam penelitian nano”. Melalui nanoteknologi, para peneliti telah mengembangkan bahan kemasan yang dapat memperpanjang umur simpan produk pangan dan meningkatkan keamanan pangan. Namun, belakangan ini melalui nanoteknologi, bahan-bahan yang dapat terurai secara hayati telah dikembangkan untuk menggantikan bahan-bahan polimer plastik yang tidak dapat terurai, yang dapat menjadi masalah lingkungan yang serius secara global.

2. Manfaat Nanoteknologi dalam Kemasan Pangan

Penerapan nanoteknologi dalam kemasan pangan dapat membawa banyak manfaat bagi konsumen. Penggunaan nano-sensor bisa sangat bermanfaat. Beberapa dari nano-sensor ini termasuk sensor berbasis nanopartikel, hidung elektronik, *array* bio-sensor, kantilever nano, nanopartikel dalam larutan, dan strip uji nano. Sensor nano dalam kemasan pangan telah digunakan untuk melacak kondisi eksternal atau internal produk pangan, pelet, dan wadah di seluruh rantai pasok pangan untuk mengontrol kerusakan dan pembusukan pangan.

Sensor nano telah ditemukan dalam kemasan plastik untuk membantu mendeteksi gas dalam pangan saat rusak dan memperingatkan konsumen saat kemasan berubah warna. Nanopartikel silikat telah digunakan untuk mengurangi aliran oksigen ke dalam kemasan dan mengeluarkan uap air dari kemasan untuk menjaga kesegaran pangan. Nanopartikel silikat juga dapat digunakan untuk memperlambat atau mengurangi pertumbuhan jamur di dalam lemari es untuk

meningkatkan kualitas dan keamanan pangan. Sensor untuk mendeteksi kontaminasi *Escherichia coli* dalam pangan kemasan juga telah dikembangkan. Limbah kemasan yang terkait dengan pangan olahan dapat dikurangi dengan nanoteknologi yang juga dapat membantu mengawetkan makanan segar untuk memperpanjang masa pakainya.

Bahan kemasan cerdas diproduksi dengan bantuan nanoteknologi untuk memperpanjang umur simpan produk dan memungkinkan mereka untuk mengangkut produk lebih jauh. Bahan kemasan cerdas yang mengandung sensor nano dan antimikrob telah dikembangkan untuk mendeteksi pembusukan pangan. Partikel nano yang mengandung antimikrob untuk memperpanjang umur simpan memungkinkan supermarket untuk menyimpan pangan lebih lama sebelum penjualannya dikembangkan.

3. Nanoteknologi dan Keamanan Pangan

Secara global, keamanan pangan telah mengambil posisi penting sebagai masalah kesehatan masyarakat dan konsumen prihatin dengan keamanan pangan yang mereka makan. Telah dilaporkan bahwa lebih dari 20 juta kasus kematian tercatat setiap tahun di dunia sebagai akibat dari penyakit mikrob bawaan pangan. Tujuan utama dari keamanan pangan secara global adalah untuk memastikan bahwa pangan tidak akan menimbulkan kerugian bagi konsumen sebagai akibat dari pengolahan dan konsumsinya. Oleh karena itu, pangan harus dilindungi secara memadai dari kontaminasi fisik, kimia, dan biologis yang mungkin terjadi akibat pengolahan, penanganan, dan distribusi.

Nanoteknologi dapat mengubah persepsi kita dan membawa perubahan radikal pada industri pangan karena beberapa aplikasinya dalam produksi, pemrosesan, dan distribusi pangan. Nanoteknologi dapat membantu memperpanjang umur simpan, meningkatkan keamanan pangan, dan mengurangi limbah kemasan. Hal ini juga dapat membantu menjaga rasa dan kesegaran pangan.

a. Potensi Risiko dalam Kemasan

Nanoteknologi dapat memiliki dampak yang luar biasa dalam kemasan pangan jika dilakukan dengan hati-hati. Beberapa penelitian telah mengungkapkan bahwa konsumen lebih bersedia menerima nanomaterial dalam kemasan pangan daripada dalam pangan itu sendiri (Siegrist dkk., 2007). Namun, ada kekhawatiran bahwa bahan nano yang digunakan dalam kemasan pangan berpotensi berpindah ke pangan itu sendiri yang mengakibatkan risiko kesehatan bagi konsumen. Studi oleh peneliti yang berbeda pada nano-partikel titania, perak, dan CNTs telah menunjukkan bahwa nanomaterial ditemukan dalam sirkulasi darah dan karena ketidaklarutan mereka dapat menumpuk di organ tubuh dengan konsekuensi serius (Kim dkk., 2008; Rhim dkk., 2013).

Komposit nano melepaskan sejumlah kecil partikel ke pangan melalui kemasan. Kuantitas migrasi kecil dan dalam batas yang ditetapkan oleh Komisi Eropa (EC) untuk nano-komposit. Panea dkk. (2014) menemukan pada nanopartikel Ag dan ZnO bahwa migrasi partikel dari nanopartikel ke pangan lebih rendah dari batas yang ditetapkan oleh EC. Namun, nanopartikel ZnO bahkan dalam jumlah kecil berpotensi menyebabkan genotoksisitas pada sel epidermis. Suhu ketika kemasan disimpan dan waktu memengaruhi migrasi nanopartikel ke pangan dari kemasan.

b. Regulasi Nanoteknologi dalam Pangan

Regulasi nanoteknologi dalam pangan sangat penting untuk kesejahteraan konsumen dan dapat membantu dalam merevolusi penggunaan bahan nano dalam kemasan pangan. Ramachandriah dkk. (2015) berpendapat bahwa masalah regulasi penggunaan nanoteknologi di Amerika Serikat disebabkan oleh kurangnya kerangka regulasi tunggal yang komprehensif untuk memastikan keselamatan konsumen. Kekeringan informasi yang diperlukan, model yang tidak memadai untuk menunjukkan pada dunia nyata tentang kemasan nano, dan kemacetan administrasi lembaga pemerintah adalah

kendala utama dalam mengatur produk nano. Lambatnya penelitian penilaian risiko telah memengaruhi regulasi bahan nano. Namun, mereka menyarankan bahwa penilaian keamanan kemasan pangan sangat penting untuk memastikan keamanan kemasan nano sebagai akibat dari potensi migrasi nanopartikel. Cushen dkk. (2012) melaporkan bahwa meskipun minat konsumen terhadap nanoteknologi meningkat belakangan ini, perkembangan produk nano belum memenuhi harapan konsumen dalam hal keamanan produk. Namun, Ramachandraiah dkk. (2015) percaya bahwa efektivitas regulasi dalam pangan kemasan nano berpusat pada kelengkapan definisi, kewajiban produk, dan penetapan tingkat bahan nano yang diizinkan dalam kemasan pangan.

c. Penerimaan Konsumen terhadap Nanoteknologi dalam Kemasan Pangan

Keberhasilan pengembangan produk baru berpusat pada penerimaan konsumen terhadap produk tersebut. Penerimaan suatu produk oleh konsumen dapat dipengaruhi oleh kekhawatiran konsumen tentang risiko kesehatan dan lingkungan dari produk tersebut seperti yang dapat dilihat pada pangan yang diiradiasi dan pangan yang dimodifikasi secara genetik (Ramachandraiah dkk., 2015). Meskipun harga rendah dan manfaat yang lebih luas dapat menarik konsumen untuk menerima pembelian produk pangan kemasan nano, tetapi risiko kesehatan yang dirasakan dapat memengaruhi keputusan konsumen untuk membeli produk tersebut. Di sisi lain, informasi dan pengetahuan konsumen secara signifikan memengaruhi penerimaan konsumen terhadap nanoteknologi. Penerimaan konsumen terhadap pangan kemasan nano, bagaimanapun, dapat ditingkatkan melalui peningkatan pengetahuan dan kepercayaan sosial antara konsumen dan perusahaan yang memproduksi pangan kemasan nano. Oleh karena itu, meningkatkan pendidikan konsumen bisa menjadi jalan yang benar-benar untuk meningkatkan penerimaan konsumen terhadap pangan kemasan nano.

d. Masalah Keamanan Konsumen

Magnuson dkk. (2011) melaporkan bahwa penelitian tentang aplikasi nanoteknologi dalam pengolahan dan pengemasan pangan terus meningkat dan potensi nanoteknologi dalam pengemasan pangan semakin menjanjikan begitu pun pada saat yang sama campur tangan manusia terhadap zat-zat tersebut. Oleh karena itu, paparan manusia terhadap bahan nano akan meningkat dalam berbagai cara. Namun, perawatan perlu dilakukan untuk menjaga kesehatan konsumen pangan kemasan nano. Beberapa penelitian telah dilakukan tentang potensi toksisitas bahan nano dalam pangan dengan menganalisis bahan nano yang digunakan dalam kemasan pangan. Selain itu, temuan penelitian telah menunjukkan bahwa ada sedikit informasi tentang ketersediaan hayati dan biodistribusi bahan nano dan toksisitas bahan nano pada paparan manusia. Bahan nano yang digunakan sebagai bahan tambahan pangan memiliki kontak langsung dengan organ manusia yang mengakibatkan tingkat paparan yang lebih tinggi pada manusia tergantung pada konsentrasinya dalam pangan dan jumlah pangan yang dikonsumsi. Peningkatan penggunaan zat nanomaterial dalam pangan sebagai aditif rasa atau warna telah menarik perhatian yang signifikan dari sektor publik dan pemerintah.

Pelapis *nano-edible* telah dikembangkan dan semakin banyak digunakan sebagai sarana untuk menjaga kualitas pangan, memperpanjang umur penyimpanan, dan mencegah pembusukan mikroba pangan. Beberapa aplikasi berupa penggunaan *edible coating* berbasis gelatin yang terbuat dari kristal nano selulosa, penggunaan pelapis kitosan/nano-silika, penggunaan film kitosan dengan nano-SiO₂, dan penggunaan pelapis nanolaminasi alginat/lisozim sebagai pengawet untuk meningkatkan kualitas pangan segar. Yang dkk. (2010) telah mengevaluasi dan menilai pengaruh polietilen dengan bubuk nano (nano-Ag, kaolin, anatase TiO₂, dan rutil TiO₂) terhadap peningkatan kualitas buah stroberi. Namun, tidak satu pun dari penelitian tersebut yang bekerja pada studi toksikologi bahan nano ini pada paparan manusia.

Beberapa peneliti seperti He dkk. (2015) telah menunjukkan bahwa toksisitas nanomaterial dalam pangan dan kemasannya tergantung pada karakteristik fisiokimia dan dosis. Selain itu, penelitian telah menunjukkan bahwa aplikasi nanoteknologi yang aman dalam industri pangan membutuhkan karakterisasi dan penilaian yang menyeluruh (He dkk., 2015).

Penggunaan dan paparan bahan nano pada manusia dapat mengakibatkan alergi dan pelepasan logam berat yang dapat mengganggu kesehatan konsumen. Reaksi fisiologis terhadap bahan tambahan pangan penting dalam memperkenalkan bahan baru ke dalam pangan. Paparan manusia terhadap bahan nano dapat mengakibatkan respons inflamasi dan peningkatan produksi ROS. Yoshida dkk. (2011) telah melaporkan bahwa nanopartikel SiO_2 dapat menginduksi respons imun alergi tipe Th2 spesifik alergen secara *in vivo*, sebagaimana terbukti dari penelitian pada tikus BALB/c betina yang terpapar nanopartikel.

Demikian juga, Nygaard dkk. (2009) telah mempelajari peradangan alergi akibat paparan karbon nanomaterial. Nygaard dkk. (2009) mengemukakan bahwa peningkatan peradangan paru-paru dan kadar IgE spesifik alergen pada tikus yang sensitif terhadap alergen telur OVA adalah sebagai akibat dari paparan nanotube karbon berdinding tunggal dan berdinding ganda.

Bahan nano berbasis logam yang terintegrasi dengan polimer kontak pangan dapat meningkatkan sifat mekanik dan penghalang, mengurangi fotodegradasi plastik, dan bertindak efektif terhadap mikroorganisme seperti ion logam berat. Penelitian oleh He dkk. (2015) mengungkapkan bahwa pelepasan logam berat dari bahan nano adalah jalur utama yang mengarah pada hasil toksik. Namun, karena akumulasi jangka panjang logam berat sebagai akibat dari pelepasannya, efek sampingnya tidak dapat diabaikan. ZnO, Ag, dan CuO sebagai tiga nanomaterial logam yang paling banyak terlindi. Peningkatan kadar ROS intraseluler yang dapat mengakibatkan perok-

sidasi lipid dan kerusakan DNA sangat berkorelasi dengan pelepasan ion logam dari bahan nano logam tersebut.

Sifat-sifat bahan nano telah ditemukan memiliki efek pada tubuh manusia. Beberapa partikel nano hidrofilik dan bermuatan positif meningkatkan waktu sirkulasi secara signifikan. Pekkanen dkk. (2002) melaporkan bahwa partikel nano yang memasuki aliran darah dapat memengaruhi lapisan pembuluh darah dan meningkatkan pembentukan bekuan darah atau mungkin berhubungan dengan efek kardiovaskular. Telah dilaporkan oleh Long dkk. (2006) bahwa ada peningkatan produksi oksigen reaktif dalam sel mikroglial otak yang terekam, tetapi tidak ada bukti yang meyakinkan tentang efek ENM di otak hewan. Menurut (Baltic dkk., 2013) beberapa nanopartikel dapat melintasi darah otak dan memasuki sel dan organ serta dapat berinteraksi dengan metabolisme atau bermigrasi dalam janin.

Aschberger dkk. (2011) melaporkan bahwa sifat dan jalur masuk dalam tubuh, konsentrasi, dan lama paparan nanopartikel memengaruhi toksisitas nanopartikel. Mereka juga menunjukkan bahwa rute oral transmisi nanopartikel dan manifestasi dari tanda-tanda toksisitas dicatat hanya pada dosis yang relatif tinggi dari nano-perak atau nano-TiO₂ yang diterapkan. Fibrosis, genotoksitas, dan kanker yang mungkin disebabkan oleh nanopartikel merupakan efek yang paling diperhatikan dari nanopartikel dalam pangan (Aschberger dkk., 2011). Terlepas dari toksisitas dan genotoksitas yang mungkin dihasilkan dari nanopartikel, efek merugikan utama dari nanopartikel yang paling menarik perhatian konsumen dan peneliti adalah kanker.

Baltic dkk. (2013) menyatakan bahwa nanopartikel ZnO memiliki potensi genotoksik dalam sel epidermis manusia. Karsinogenisitasnya dapat disebabkan oleh pembentukan granuloma dan fibrosis lokal di paru-paru. Selain itu, Aschberger dkk. (2011) telah melaporkan tumor paru-paru sebagai akibat dari inhalasi partikel nano-TiO₂ sangat tinggi.

Kesimpulannya, aplikasi nanoteknologi dalam kemasan pangan adalah bidang baru yang dapat mengubah persepsi kita serta penanganan dan penyajian produk pangan, melalui sistem yang me-

miliki penghalang yang efisien dan sifat antimikrob. Namun, aplikasi nanoteknologi dalam kemasan pangan adalah bidang penelitian yang muncul dan dapat mengubah seluruh kemasan pangan. Meskipun ada potensi besar penggunaan nanoteknologi dalam kemasan pangan, potensi risiko kesehatan juga terkait dengan penggunaan beberapa bahan nano dalam kemasan pangan menjadi perhatian utama yang harus dipelajari dengan cermat. Namun, selain mengisi kesenjangan pengetahuan dalam produksi dan keamanan bahan nano dalam kemasan pangan, meningkatkan penerimaan konsumen, ekonomi, dan regulasi yang komprehensif bisa menjadi penting untuk aplikasi.

Sektor pangan dan barang konsumen yang bergerak cepat/*fast-moving consumer goods* (FMCG) global menghasilkan pendapatan triliunan dolar. Namun, setiap tahun industri pangan global juga merugi miliaran dolar AS karena penipuan dan pemalsuan. Hal yang lebih buruk adalah pemalsuan pangan yang tentu membawa risiko kesehatan masyarakat yang parah bagi konsumen, di samping dampak ekonomi signifikan yang dirasakan oleh produsen. Untungnya, teknologi dan alat baru di bidang pengemasan pintar saat ini menawarkan solusi untuk memerangi pemalsuan, penipuan pangan, dan aktivitas ilegal FMCG lainnya. Berkat alat seperti label anti pencurian dan pemalsuan, *tag* NFC, *blockchain*, dan AI, solusi pengemasan pintar memungkinkan produsen dan konsumen menikmati tingkat kontrol yang lebih besar atas bahan, asal, rantai pasok, dan distribusi pangan mereka. Berkaitan dengan penggunaan teknologi anti pemalsuan, Bab IX secara lebih detail membahas teknologi ini dan perannya dalam mencegah tindakan pemalsuan pangan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB 9

Teknologi Anti-pemalsuan (*Anti-Counterfeiting*)

A. Mengembangkan Tindakan Anti-pemalsuan

Aktivitas pemalsuan ada di mana-mana dalam industri yang memengaruhi produk mulai dari obat-obatan dan peralatan medis melalui mesin, listrik, otomotif dan suku cadang pesawat, pakaian, *fashion item*, film, perangkat lunak komputer, hingga rokok. Global Brand Counterfeiting Report (2018) memperkirakan bahwa nilai pemalsuan global adalah US\$1,2 triliun per tahun dan mencapai US\$1,82 triliun pada tahun 2020 dengan distribusi *online* produk palsu mencapai US\$323 miliar per tahun. Pemalsuan makanan dan minuman adalah masalah kuno. Contohnya, kita dapat kembali ke zaman kuno. Sebuah *stopper* untuk amphora anggur tertanggal 27 SM menunjukkan upaya untuk mengganti anggur Romawi dengan anggur Prancis yang lebih murah dan pada abad ke-14. *Elector Palatine* di Kekaisaran Romawi Suci menghukum mati pengecer anggur karena mencoba menjual produk palsu. Contoh produk makanan dan minuman palsu yang

diakui antara lain anggur, susu formula bayi, dan alkohol. Sepuluh persen botol atau kaleng bir yang dijual di Inggris (UK) dikatakan palsu (Snowdon, 2012). Perdagangan alkohol palsu bersifat oportunistik dan ada hubungan antara penjualan dan produksi alkohol palsu serta kelompok kriminal Eropa Timur yang berbasis di Inggris, produk itu misalnya vodka sering dijual melalui pengecer kecil atau jaringan pribadi. Contoh penyitaan alkohol palsu di Inggris menunjukkan jenis masalah yang diidentifikasi dalam Tabel 9.1.

Tabel 9.1 Insiden Pemalsuan

Insiden pemalsuan di Inggris baru-baru ini terkait dengan alkohol	
a)	Lebih dari 35.000 botol palsu merek vodka, buatan Ukraina, disita di Dover pada April 2014;
b)	lebih dari 20.000 botol palsu untuk merek vodka disita dari tempat-tempat di Derbyshire pada November 2014;
c)	penyitaan di Harlow sejumlah hampir 8000 liter vodka dari Lituania dengan materai palsu pada Juni 2015;
d)	130.000 liter spiritus yang berpotensi beracun ditemukan di Cheshire pada bulan Juli/Agustus 2015, di samping bahan untuk memfasilitasi pembotolan dan pengemasannya; serta
e)	operasi pembotolan wiski palsu yang ditemukan di London pada tahun 2017 dengan ratusan botol wiski, rum, dan minuman beralkohol lainnya diisi ulang dengan cairan yang lebih murah.

Sumber: Paskin (2017)

Penyelundupan tidak dibahas secara mendalam dalam bab ini, tetapi terdapat bukti yang tersebar luas tentang penyelundupan barang palsu. Kegiatan pemalsuan meliputi penjualan dan pembuatan produk dengan menggunakan merek tanpa izin pemilik merek tersebut. Kegiatan pemalsuan yang bermotif ekonomi sering kali memproduksi produk inferior yang relatif murah dibandingkan dengan biaya produksi barang asli. Pemalsuan ini dikaitkan dengan barang-barang yang memiliki nilai merek tinggi. Praktik tersebut menyebabkan kerugian nyata seperti berkurangnya penjualan dan pendapatan, berkurangnya keuntungan, hilangnya biaya pengembangan, pekerjaan, peningkatan biaya hukum, defisit perdagangan, biaya verifikasi,

dan deteksi. Pada akhirnya, pemalsuan merusak nilai merek, niat baik, kepercayaan konsumen, reputasi merek, hak kekayaan intelektual merek dagang terkait, dan, jika barang palsu di bawah standar, sulit bagi konsumen untuk membedakannya dari produk yang sah, dapat menyebabkan klaim pertanggungjawaban. Perjanjian *Trade-Related Aspects of Intellectual Property Rights* (TRIPS) mendefinisikan barang merek dagang palsu sebagai “setiap barang, termasuk kemasan, tanpa izin menyanggah merek dagang yang identik dengan merek dagang yang terdaftar secara sah sehubungan dengan barang tersebut atau yang tidak dapat dibedakan dalam aspek-aspek esensial dari merek tersebut, yang dengan demikian melanggar hak-hak pemilik merek yang bersangkutan menurut hukum negara pengimpor” (WTO, 1994).

Keterikatan emosional pada suatu merek akan mengurangi kemungkinan konsumen bersedia membeli produk palsu alternatif. Namun, ada titik kritis ketika pembelian produk palsu dapat dianggap dapat diterima dan tantangan ini dipertimbangkan di sini dengan menggunakan wiski sebagai contoh produk.

Wiski Scotch mewakili sekitar seperempat dari total ekspor makanan dan minuman Inggris ke 200 pasar global dan mendukung 40.000 pekerjaan serta bernilai sekitar £4 miliar dalam ekspor tahunan (Shand dkk., 2017). Wiski Scotch adalah minuman mewah yang menjadikannya target para pemalsu untuk memproduksi alkohol dengan nama yang dilindungi. Wiski Scotch dibuat di Skotlandia dari tiga bahan mentah: sereal, ragi dan air. Proses ini saat ini diatur dalam Peraturan Wiski Scotch.

Pada 2015–2016, penyitaan merek alkohol “palsu” (termasuk wiski dan vodka) dilakukan di Yunani. Botol kosong asli diselundupkan dari Bulgaria dan palsu diproduksi di laboratorium bawah tanah (Europol, 2016). Sementara itu, dalam insiden lain di Zambia, wiski bermerek curian dijual kepada produsen alkohol ilegal. Inspeksi dan penutupan pabrik bawah tanah lainnya dilakukan dalam Operasi Opson VII (Interpol, 2018). Dalam kasus lain, lebih dari 1,6 juta liter alkohol yang diproduksi secara ilegal disita di Rusia. Memang, tes terbaru mengungkapkan bahwa lebih dari sepertiga Wiski Scotch *vintage*

bisa jadi palsu dengan nilai £41 juta (BBC, 2018). Wiski diproduksi di bagian lain dunia tetapi bahan yang berbeda sering digunakan. Wiski AS dibuat di Kentucky, Tennessee, dan lokasi lain dari berbagai sereal termasuk gandum hitam, jagung, dan barley dengan proses pematangan yang berbeda. Wiski Tennessee Jack Daniel menempati volume penjualan wiski AS terbesar dengan 10% pangsa pasar dan penjualan tahunan sebesar US\$233 juta dolar (Statista, 2019). Lamanya waktu penyimpanan wiski akan bervariasi menurut metode produksi dan untuk memberikan kualitas “*peaty*” pada beberapa Wiski Scotch. Jelai malt basah diberi asap gambut sehingga memberikan rasa yang unik.

Inggris, dengan satu orang menerima hukuman percobaan, satu menerima hukuman penjara delapan belas bulan, dan dua hukuman lagi tujuh tahun (BBC, 2018), menjadi hukuman penjara maksimum untuk penipuan sebagaimana ditetapkan oleh Bea dan Cukai Inggris *Management Act, 1979*. Denda finansial pada hukuman adalah £20.000 atau tiga kali nilai barang. Bab ini mengambil contoh pemalsuan Wiski Scotch dan berfokus pada penggunaan teknologi pintar untuk mengurangi risiko pemalsuan. Selain itu, penulis memperkenalkan konsep pemalsuan dan kemudian mempertimbangkan jenis kegiatan pemalsuan, potensi strategi, dan tindakan anti-pemalsuan yang dapat digunakan untuk memberikan rekomendasi penggunaan teknologi pintar sebagai bagian dari strategi bisnis yang lebih luas.

1. Tipologi Pemalsuan

Pemalsuan melibatkan substitusi, penempatan produk yang lebih rendah dalam kemasan asli atau kemasan yang digunakan kembali; duplikasi, penyalinan langsung kemasan, produk, dan/atau instruksi; merusak dengan mengganggu kemasan atau label dan mengganti produk asli dengan barang lain; serta pengembalian dan penipuan garansi (Zadbuke dkk., 2013).

Ketika mengkritik tipologi pemalsuan, penting untuk mempertimbangkan sifat bawaan barang bermerek, yaitu barang atau produk yang memiliki merek dagang terdaftar dengan hak kekayaan intelektual terkait dan bagaimana hal ini dapat disalin oleh orang

lain. Sementara barang palsu adalah salinan persis dari barang asli, di sisi lain “barang imitasi atau tiruan” terlihat mirip dengan barang bermerek, tetapi tidak identik dan sering kali tidak memiliki tingkat kualitas atau kinerja yang sama. Produk imitasi atau tiruan tidak mengandung salinan merek dagang palsu. Imitasi Shanzhai mewakili jenis imitasi yang meniru merek asli melalui kesamaan permukaan atau fungsional, tetapi sering kali memberikan fitur yang disempurnakan atau inovatif yang disesuaikan dengan kebutuhan pasar lokal (Qin dkk., 2018). Mereka membangun peningkatan atau fitur yang tidak termasuk dalam produk asli sehingga bukan merupakan salinan langsung.

Sementara pemalsuan adalah ilegal, dalam beberapa kasus imitasi, meskipun tidak sah oleh pemilik merek, mungkin sah dan tidak melanggar undang-undang hak cipta. Kegiatan ini, seperti terlihat pada *private label*, peniruan produk bermerek dilakukan untuk membuat produk “seperti” aslinya. Fenomena imitasi ini digambarkan sebagai “*halo of similarity*” bagi konsumen yang dapat membuat kesimpulan dari kesamaan visual dan konteks produk bermerek. Kesamaan dengan merek asli dapat membingungkan konsumen dan dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu literal; nama produk dapat memiliki huruf yang sama atau urutan huruf yang sama; dan makna semantik; nama berbeda tetapi atribut ekstrinsik produk ditiru. Namun, imitasi produk dapat menyebabkan konsumen percaya ada hubungan atau afiliasi antara produk imitasi dan merek yang ditiru. Kebingungan ini dapat menyebabkan penurunan preferensi merek dan kecenderungan konsumen untuk membeli alternatif harga yang lebih rendah. Dengan produk imitasi, tidak ada niat untuk menipu konsumen, tetapi ada *driver* implisit untuk menggunakan kesamaan demi mendorong penjualan versi imitasi.

a. Barang Palsu yang Tidak Menipu

Pemalsuan nontipu hanya bisa ada jika ada permintaan dari konsumen untuk barang tersebut serta pasokan dari pemalsu. Le Roux dkk. (2016) membedakan antara pemalsuan yang menipu dan tidak

Tabel 9.2 Tipologi Peniru dan Pemalsu

	Peniru	Fraudster	Desperados	Disagregator	Penyelundup
Kemampuan	Keterampilan rekayasa ulang dan rekayasa yang kuat. Kemampuan produksi yang diperluas.	Beberapa kemampuan produksi.	Kemampuan untuk menyembunyikan kegiatan terlarang	Membangun jaringan produksi untuk produk palsu atau dapat mengembangkan keterampilan produksi sendiri. Fleksibilitas—mampu mengikuti tren baru dengan cepat.	Mengelola jaringan pelaku tindakan pencucian uang.
Model Bisnis	Imitasi merek sebagai akselerator. Produk yang kompatibel dengan harga rendah untuk fungsionalitas. Niat untuk melibatkan konsumen dalam hal asosiasi antara merek dan produk tiruan. Hal ini dapat menyebabkan kebingungan.	Pemalsuan merek sebagai pemicu barang haram. Penipuan pelanggan.	Pemalsuan merek sebagai <i>enabler</i> untuk menjual barang berbahaya. Targetkan produk mahal, tetapi mudah ditiru. Penipuan pelanggan.	Pemalsuan merek sebagai sumber pendapatan dominan. Melayani keinginan pelanggan untuk menandakan kekayaan dan status.	Pemalsuan merek untuk meningkatkan akses pasar. Menghindari pajak atau retribusi atau menjual barang curian.
Fokus Strategis	Keunggulan kompetitif. Kewirausahaan.	Oportunisme orientasi keuntungan	Orientasi keuntungan maksimal dengan tidak adanya standar etika.	Fleksibilitas fokus pada barang dengan permintaan tinggi.	Perluas kekuasaan dalam jaringan kriminal. Struktur mapan, orientasi jangka panjang.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Peniru	Fraudster	Desperados	Disagregator	Penyelundup
Produk Khas	Barang konsumsi yang bergerak cepat.	Produk farmasi	Jam tangan dan perhiasan	Rokok
Kegunaan	Kualitas visual dan fungsional yang tinggi—memenuhi kebutuhan pengguna.	Kualitas rendah dan sulit dievaluasi oleh konsumen sebelum membeli. Dapat merugikan konsumen.	Kualitas rata-rata. Kompleksitas rendah hingga rata-rata.	
Penanggulan	Diproduksi dalam skala besar sehingga rentan terhadap penyitaan produk karena memiliki tingkat modal yang tinggi. Sering dijual dalam rantai yang sah sehingga tata kelola rantai pasok dapat diperkenalkan untuk mencegah penipuan. Banyak pemilik merek mungkin tidak siap untuk terlibat dengan pengecer label pribadi melalui proses pengadilan.	Mencegah akses ke rantai pasok yang sah. Meningkatkan kesadaran konsumen akan produk palsu.	Meningkatkan kesadaran konsumen akan produk palsu.	Sering kali memiliki rantai pasokan gelap yang sulit untuk disusupi.

Sumber: Staake dkk. (2012); Wimmer & Yoon (2017)

Buku ini tidak diperjualbelikan.

menipu. Adapun dapat dikatakan menipu adalah ketika konsumen tidak menyadari bahwa produk tersebut palsu dan dapat dikatakan tidak menipu ketika konsumen membeli produk tersebut dengan mengetahui bahwa itu adalah palsu. Barang palsu yang tidak menipu dapat dibedakan baik secara visual atau berdasarkan jenis saluran penjualan dan distribusi yang digunakan untuk menjualnya dari produk bermerek asli yang dirancang untuk ditiru. Konsumen mungkin rela memilih untuk membeli barang palsu yang tidak menipu karena mereka melihatnya sebagai barang murah. Di sini, dengan terminologi dalam literatur, sulit untuk membedakan dengan jelas antara apa yang dinyatakan oleh sumber sebagai produk imitasi atau apa yang memang bukan barang palsu yang menipu. Dalam bagian ini, imitasi adalah alternatif yang jelas membedakan “mirip” dan “salinan langsung”, tetapi masih berupa produk yang dapat dibedakan.

b. Pemalsuan “*Tear-down*”

Barang *tear-down* dirancang dalam proses duplikasi yang tepat untuk menipu konsumen yang tidak menaruh curiga. Ini berarti bahwa produk tersebut direkayasa ulang dengan meruntuhkan (*tear-down*) produk asli lapis demi lapis untuk menentukan bagaimana produk tersebut dapat dibangun kembali agar tampak seperti produk bermerek. Pendekatan ini mungkin melibatkan analisis dan pengujian produk itu sendiri atau pencurian spesifikasi, cetak biru, atau kekayaan intelektual lainnya.

c. “*Third Shift*” (Pergeseran Ketiga) atau Kelebihan Produk

Overruns produk terjadi ketika pemasok manufaktur yang dialihdayakan melanjutkan produksi setelah pemutusan kontrak, atau di luar jam atau volume yang disepakati untuk pembuatan, yang disebut “*third shift*” (Berman, 2008). Produksi tambahan dapat ditutupi oleh pernyataan palsu tentang pemborosan produksi atau contoh bahan yang tidak sesuai. Produk-produk ini sulit dibedakan dari produk yang sah, terutama yang menggunakan bahan atau kemasan asli (Berman, 2008). Bentuk lebih lanjut dari barang palsu adalah barang bekas yang tidak dimusnahkan seperti yang diminta pemilik merek,

tetapi malah dijual oleh agen *outsourcing* sebagai “*first quality*” dalam saluran distribusi.

d. Pemalsuan yang Berbahaya

Pemalsuan yang berbahaya dirancang agar terlihat berfungsi dengan benar, tetapi kemudian tidak berfungsi pada saat kritis atau membuka pelanggaran keamanan sehingga kompetitor mendapatkan keuntungan. Pemalsuan yang berbahaya juga dapat menjadi masalah dengan sistem digital yang dapat menyebabkan kegagalan perangkat keras yang disengaja (Takahashi dkk., 2018). Perangkat keras palsu dapat membuat organisasi rentan terhadap risiko keamanan siber dan pengenalan malware di kemudian hari. Oleh karena itu, sangat penting bahwa ada strategi mitigasi yang efektif.

e. Pemalsuan Dokumen dan Kemasan

Dokumen palsu adalah dokumen yang merupakan reproduksi dari dokumen asli yang sah. Penting bagi organisasi untuk mempertimbangkan bagaimana mereka akan memastikan integritas dokumentasi yang mereka gunakan atau terima. Elemen anti-pemalsuan dalam dokumen atau kemasan meliputi: tanda air, serat *fluorescent* dan *planchette*, pola *guilloche*, tinta fluorescent dan magnetik, tinta variabel optik, pencetakan pelangi, pencetakan mikro, gambar laten, indicia teracak, pencetakan laser, foto, tanda tangan, stempel emboss, perangkat variabel optik, film pelindung, perforasi, keamanan yang dapat dibaca mesin, dan pola retro-reflektif. *Planchette* adalah komponen datar kecil (1–5 mm) yang ditambahkan ke kertas selama proses produksi yang membawa fitur keamanan yang terlihat atau tidak terlihat seperti tinta, teks atau simbol yang dicetak mikro, zat kimia reaktif, atau tinta termokromatik yang berubah warna di bawah suhu yang berbeda. Pola *guilloche* adalah pola *interlaced* dekoratif yang tertanam dalam dokumen resmi dan uang kertas. *Scrambled indicia* terbentuk melalui proses yang dipatenkan yang menggunakan gambar atau cap yang diacak untuk mengodekan teks atau grafik dalam desain sehingga tidak dapat dibaca tanpa peralatan khusus.

Tabel 9.3 Faktor Sosial Ekonomi yang Memengaruhi Pemalsuan

Faktor	Penanggulangan
Peningkatan kompleksitas sistem	1) Legislasi dan penegakan hukum yang menangani pemalsuan.
Tata kelola kekayaan intelektual (IP) yang lemah	1) Prosedur pengadaan pemasok yang menangani manajemen kekayaan intelektual dan pemalsuan.
Globalisasi rantai pasok	1) Manajemen keusangan dan penyesuaian ulang proses dan produk baru untuk mengurangi risiko pemalsuan.
<i>Outsourcing</i> layanan termasuk desain dan manufaktur	1) Risiko menilai dan mengurangi <i>outsourcing</i> proses kritis atau produk bagian penting atau pembuatan produk jadi. 2) Prosedur ketertelusuran untuk komponen dan produk termasuk penggunaan teknologi pengemasan cerdas. 3) Pengujian program menggunakan metode analisis yang dapat mendeteksi pemalsuan.
Penggunaan internet sebagai <i>platform</i> pembelian	1) Protokol dan pelatihan manajemen siber.
Penurunan biaya barang palsu versus barang asli.	1) Pemindaian cakrawala untuk kemungkinan pemalsuan dan metode yang digunakan untuk memproduksinya. 2) Mengembangkan dan menerapkan strategi anti-pemalsuan.

Sumber: Bodner (2014)

Sebuah tipologi peniru dan pemalsu telah ditarik bersama-sama dari literatur (Tabel 9.2). Tabel tersebut menggunakan faktor-faktor seperti kemampuan, model bisnis, fokus strategis, fungsionalitas, serta tindakan pencegahan potensial untuk mengurangi risiko pemalsuan. Tindakan penanggulangan ini sebagian berfokus pada prosedur manajemen pemasok dan pengadaan. Ada beberapa faktor sosial-ekonomi yang meringkai kegiatan pemalsuan (Tabel 9.3). Peningkatan kompleksitas sistem dan globalisasi rantai pasok, *outsourcing* desain dan manufaktur yang lebih besar, serta lemahnya tata

kelola dan pengawasan hak kekayaan intelektual melintasi batas-batas nasional antara satu yurisdiksi hukum dan yurisdiksi lainnya yang meningkatkan risiko pemalsuan. Semua faktor ini perlu dipertimbangkan ketika mengembangkan tindakan anti-pemalsuan.

Teknologi anti-pemalsuan digunakan untuk mencegah, mendeteksi, dan mengendalikan pemalsuan. Teknologi ini harus mengizinkan konsumen untuk memeriksa produk dan memverifikasi bahwa produk tersebut bukan palsu. Namun, fitur anti-pemalsuan yang digunakan pada kemasan harus sulit untuk ditiru. Berbagai tindakan anti-pemalsuan termasuk teknologi pengemasan pintar sekarang dipertimbangkan.

2. Tindakan Anti-pemalsuan

Pertama, pemilik merek perlu mengatasi risiko pemalsuan dan mengembangkan sistem untuk melacak, menelusuri, mendeteksi, dan mengambil tindakan atas apa yang mereka yakini sebagai produk palsu. Ada dua elemen ketertelusuran yang menarik sebagai tindakan anti-pemalsuan, yaitu keterlacakan logistik dan keterlacakan kualitatif. Keterlacakan logistik memiliki tiga elemen, yaitu pelacakan, penelusuran, dan pencatatan. Pelacakan adalah ketertelusuran ke depan dari bahan ke produk jadi; sementara penelusuran adalah ketertelusuran terbalik dari produk jadi ke bahan dan *logging* adalah detail pergerakan fisik produk misalnya jumlah, asal, tujuan, atau tanggal pengiriman. Keterlacakan kualitatif menghubungkan informasi tambahan ke produk, misalnya teknik prapenan dan pascapenan, kondisi penyimpanan, dan distribusi. Informasi inilah yang menopang nilai merek produk.

Kedua, pemilik merek perlu memberikan informasi kepada konsumen untuk meningkatkan kesadaran akan risiko produk palsu terutama melalui peran kampanye informasi yang didukung oleh Pemerintah dan/atau selebriti. Kampanye media yang didorong oleh Pemerintah harus mempromosikan standar pembelian dan penggunaan yang etis, terutama implikasi keamanan dari barang palsu dan dampaknya terhadap bisnis yang sah dari perilaku tersebut. Kontrol

peraturan untuk mengurangi penjualan *online* produk palsu harus menetapkan standar dan memperkuat hukuman bagi penjual dan pembeli yang menyimpang dari praktik yang sah dan memperkuat kegiatan penegakan hukum. Berman (2008) menyarankan bahwa untuk mendeteksi dan mengurangi aktivitas pemalsuan, perlu dibuat protokol yang mencakup empat langkah berikut.

- a. Mengembangkan sinyal peringatan dini dari aktivitas pemalsuan. Hal ini termasuk penurunan penjualan yang tiba-tiba atau peningkatan aktivitas pasar gelap, misalnya sejumlah besar produk yang dijual di tempat diskon, toko elektronik, atau situs internet; atau peningkatan tingkat kegagalan produk, pengembalian, dan klaim terutama jika produk tersebut sulit dilacak ke catatan produksi yang sah.
- b. Berinvestasi dalam sistem manajemen untuk memantau, mencegah, dan menghapus produk palsu serta mengurangi aktivitas pemalsuan yang lebih luas. Biaya ini termasuk menyewa penyelidik internal atau penyelidik swasta atau mendirikan perusahaan palsu untuk membeli produk yang berpotensi palsu. Berinvestasi dalam strategi komunikasi dengan konsumen tentang bahaya membeli produk palsu juga penting agar mereka sadar akan masalah yang bisa terjadi.
- c. Menggunakan strategi sisi permintaan untuk mencegah aktivitas pemalsuan sejak awal. Hal ini termasuk: mengambil tindakan hukum jika diperlukan, meningkatkan kontrol pemasok dan membangun hubungan berdasarkan kepercayaan, serta melaksanakan kegiatan verifikasi. Strategi lain adalah dengan mengalihdayakan produksi suku cadang saja dan kemudian merakit produk jadi dalam bisnis pemilik merek sendiri sehingga pemalsu potensial tidak dapat menggunakan teknik “pergeseran ketiga”. Menyematkan teknologi pelacakan dan penelusuran dan/atau autentikasi yang cerdas dan berbasis basis data juga akan mencegah pemalsuan.

- d. Menggunakan strategi sisi penawaran untuk mencegah organisasi pemalsuan, misalnya penggunaan perangkat lunak untuk memantau situs web yang menggunakan istilah kunci yang terkait dengan produk bermerek, terutama istilah yang tunduk pada hak kekayaan intelektual dan pembatasan.

Elemen lain dari protokol ini adalah rintangan anti-pemalsuan. Rintangan adalah komponen sistem formal yang mengurangi peluang pemalsuan baik sebagai pencegah atau dengan membantu mendeteksi aktivitas. Rintangan dapat berupa fisik dalam hal melindungi aset struktural (penghalang, sistem produksi tertutup) atau berbasis artefak seperti prosedur dan protokol atau perlindungan siber melalui *firewall* dan perangkat lunak virus. Oleh karena itu, tindakan anti-pemalsuan merupakan rintangan yang dikembangkan sebagai tindakan *online* atau *offline* yang dimaksudkan untuk mencegah konsumen membeli produk palsu dan dirancang untuk mendorong mereka menjadi pendukung melawan produk palsu dan imitasi. Tindakan anti-pemalsuan yang diidentifikasi dalam literatur telah dikategorikan menurut cara operasinya: terkait komunikasi, terkait manajemen, terkait distribusi, terkait produk, terkait proses, dan terkait nilai sosial (Tabel 9.4.).

Tabel 9.4 Berbagai Jenis Tindakan Anti-pemalsuan

Jenis Tindakan Anti-pemalsuan	Contoh Penanggulangan
Anti-pemalsuan terkait komunikasi	<ul style="list-style-type: none"> a. Komunikasi yang berfokus pada kualitas dan tampilan asli untuk membuat konsumen sadar akan perbedaan antara versi asli dan palsu, yaitu cara mengenali yang palsu. b. Mendorong komunikasi dari mulut ke mulut tentang fitur asli. c. Komunikasi yang berfokus pada mengapa produk asli menentukan harga yang sesuai. d. Mempromosikan hubungan antara merek-perusahaan dan konsumen.

Jenis Tindakan Anti-pemalsuan	Contoh Penanggulangan
	<ul style="list-style-type: none"> e. Komunikasi harus menegaskan bahwa membeli barang palsu adalah melanggar hukum dan tidak etis, peran kelompok kriminal, dan dampaknya terhadap masyarakat (kesehatan dan kesejahteraan pekerja yang buruk, perbudakan manusia, kerja paksa) dan pangan, potensi risiko kesehatan dan keselamatan; misalnya kematian karena mengonsumsi alkohol palsu yang mengandung metanol); konsekuensinya terhadap perusahaan yang sah (kebangkrutan, kehilangan pekerjaan), dan hilangnya pendapatan pajak serta dampaknya terhadap rumah sakit, sekolah, dan lain-lain.
Anti-pemalsuan terkait distribusi	<ul style="list-style-type: none"> a. Memberikan garansi dan layanan purna jual kepada konsumen jika mereka membeli yang asli. b. Berikan informasi tentang pengecer resmi yang menjual produk asli dan menerapkan program verifikasi penjual sehingga mereka dapat diperiksa kepatuhannya. c. Memperkenalkan sistem keterlacakan dan program pencegahan kerugian yang beroperasi pada tingkat rantai pasokan. Ini harus mencakup program audit pemasok. d. Kembangkan prosedur pembuangan produk yang membatasi potensi produk di bawah standar untuk dijual di jaringan abu-abu. e. Tampilkan sertifikasi dalam pengecer resmi. f. Batasi penjualan atau jika beroperasi di lingkungan tersebut, kembangkan protokol integritas khusus untuk wilayah atau rantai pasokan yang diketahui rusak.
Anti-pemalsuan terkait harga	<ul style="list-style-type: none"> a. Kurangi kesenjangan harga dengan memperkenalkan jalur masuk produk dengan harga lebih rendah. b. Meninjau dan mengurangi biaya pasar, transaksi, dan produksi untuk meminimalkan risiko orang lain yang mengurangi biaya produk.

Jenis Tindakan Anti-pemalsuan	Contoh Penanggulangan
Anti-pemalsuan terkait produk	<ul style="list-style-type: none"> a. Bedakan produk asli sebanyak mungkin dan tekankan keasliannya, misalnya menggunakan pelabelan yang berbeda, nomor seri, kode, dan fitur kemasan. b. Membedakan antara manfaat kualitas produk berwujud (tenaga kerja, rasa, daya tahan) dan manfaat kualitas produk tidak berwujud (prestise, citra, penerimaan sosial). c. Sertifikat autentikasi dan teknologi yang sulit untuk ditiru. d. Pastikan pembelian produk autentik memungkinkan akses ke manfaat konsumen tambahan, misalnya harga yang lebih rendah. e. Memberikan manfaat fungsional yang tidak mudah direproduksi dan mendorong inovasi produk untuk membatasi kemampuan orang lain dalam menghasilkan produk Shanzhai (budaya meniru). f. Lindungi produk dengan melindungi teknologi inti dan tidak mengalihdayakan seluruh proses manufaktur.
Anti-pemalsuan terkait nilai sosial	<ul style="list-style-type: none"> a. Buat wacana yang menganggap membeli barang tiruan berbahaya. b. Mempromosikan manfaat tidak berwujud dari merek melalui membangun komunitas eksklusif.
Anti-pemalsuan terkait sistem manajemen	<ul style="list-style-type: none"> a. Pastikan bahwa kebijakan mutu dan sasaran mutu organisasi mengacu pada strategi anti-pemalsuan dan mengintegrasikan strategi anti-pemalsuan. b. Tetapkan komitmen kepemimpinan dan manajemen senior yang jelas baik di dalam maupun di luar bisnis yang membahas protokol anti-pemalsuan. c. Pastikan strategi pengembangan produk mengenali kebutuhan untuk mengembangkan tindakan anti-pemalsuan dan memastikan ada proses evolusi produk yang berkelanjutan untuk mempersulit pemalsuan.

Jenis Tindakan Anti-pemalsuan	Contoh Penanggulangan
	<ul style="list-style-type: none"> d. Kembangkan program kesadaran dan pelatihan karyawan yang berfokus pada hak kekayaan intelektual dan bagaimana memberi tahu produk yang sah dan palsu nilai (ekonomi dan sosial) dari strategi anti-pemalsuan kepada bisnis dan konsumen. e. Pastikan karyawan mengetahui struktur pelaporan untuk mengidentifikasi dan menangani aktivitas pemalsuan.

Sumber: Qin dkk. (2018)

Munculnya penggunaan internet, dengan tata kelola yang terbatas seputar tindakan anti-pemalsuan, telah memungkinkan saluran distribusi global berkembang untuk barang-barang palsu sampai ke tangan miliaran orang. Operasi pemalsuan dapat mengatur beberapa situs web yang secara visual mirip dengan keberadaan web asli yang sering bersembunyi di balik anonimitas lingkup operasi internasional dan rintangan terbatas yang ada untuk mencegah aktivitas mereka. Beberapa pemalsu di dunia fisik juga mendirikan perusahaan atau personel untuk mendaftarkan bisnis dan mengeluarkan uang melalui pihak ketiga dan memalsukan catatan produksi, penjualan dan stok, serta menggunakan nama produk pangan asli sehingga akuntansi forensik mungkin terbatas dalam caranya mengidentifikasi bukti pemalsuan. Namun, ada peningkatan penekanan pada penggunaan teknologi pintar yang disematkan ke dalam kemasan yang dapat mengurangi risiko pemalsuan. Peran tindakan anti-pemalsuan terkait pengemasan sekarang dipertimbangkan secara lebih rinci, dengan fokus pada penerapannya di industri Wiski Scotch.

3. Pengemasan Terkait Tindakan Anti-pemalsuan

a. Kontrol Kemasan Bekas

Menurut SafeProof (2018), mengisi ulang dan menggunakan kembali alkohol dan botol anggur adalah salah satu praktik pemalsuan

yang paling umum. Menjual alkohol dan botol anggur kosong yang berlabel mendorong penerimaan sehingga perdagangan botol kosong dilakukan dan untuk anggur kualitas tinggi. Botol tersebut dapat dijual kembali seharga £300 sehingga produsen meminta agar botol kosong dihancurkan di restoran. Mengisi ulang botol kosong adalah metode yang disukai di antara pemalsu terutama di Tiongkok di mana memang jaringan pemulihan botol kosong telah didirikan oleh pemalsu Tiongkok. Pemalsu juga dapat membeli replika botol, tutup, label, dan kotak secara *online* untuk memungkinkan mereka memproduksi produk palsu dengan alkohol kualitas rendah.

b. Tindakan Anti-pemalsuan Keterlacakan (Melacak dan Menelusuri Teknologi)

Barcode adalah simbol yang dapat dibaca mesin optik yang terdiri dari pola batang dan spasi untuk mewakili produk dan produsen melalui nomor identifikasi. *Barcode* tetap menjadi simbologi yang paling umum digunakan untuk mengidentifikasi produk dan memfasilitasi pengendalian persediaan. Perangkat yang dapat dibaca mesin, misalnya *barcode* atau kode respons cepat/*quick response* (QR), memungkinkan pemeriksaan data dan berbagi data elektronik. Seiring waktu, *barcode* telah berevolusi dari Kode Produk Universal (1D) menjadi kode Respons Cepat 2D (QR) dengan kapasitas penyimpanan data yang tinggi. *Barcode* 1D bernilai dalam hal mengidentifikasi asal pangan dan memungkinkan pelacakan dan penelusuran (Tabel 9.4). *Barcode* 2D juga memungkinkan konsumen untuk menggunakan aplikasi ponsel pintar untuk menentukan keaslian produk. Namun, Lecat dkk. (2017) berpendapat bahwa sementara kemudahan integrasi, keterbacaan, dan peluang pemasaran langsung menjadi kelebihan, identifikasi *batch* dan keamanan yang rendah menjadi kelemahan teknologi ini.

Microchip identifikasi frekuensi radio (RFID) adalah pembawa data yang lebih canggih dibandingkan dengan *barcode* dan memiliki kapasitas penyimpanan data yang lebih tinggi. RFID digunakan untuk identifikasi dan keterlacakan produk dan informasi dapat

dikumpulkan secara otomatis, tanpa perlu pemindaian visual seperti halnya *barcode*. Teknologi RFID menggunakan gelombang radio dalam jarak dekat untuk mengumpulkan, menyimpan, dan mengelola informasi antara *tag*, pembaca, dan perangkat lunak terkait. RFID menjadi serbaguna karena *tag* dapat dimasukkan ke dalam kemasan dan memungkinkan pembacaan melalui berbagai bahan (misalnya kertas, plastik), bersifat noninvasif dan memungkinkan ketertelusuran di seluruh rantai distribusi. Studi sebelumnya telah menggunakan RFID dalam kombinasi dengan *Global Positioning System* (GPS) dan indikator waktu-suhu untuk memantau lokasi kendaraan, suhu, dan pembukaan pintu kendaraan yang tidak sah untuk pangan yang disajikan selama Olimpiade Beijing 2008. *Barcode* dan RFID adalah dua teknologi yang paling umum digunakan dalam ketertelusuran dan pelacakan. Faktanya, penerapan RFID telah meluas dari keterlacakan hingga identifikasi unit individu karena risiko pemalsuan dapat muncul dari pelaku dalam rantai pasok, misalkan pengangkut atau importir. Teknologi anti-pemalsuan khusus sekarang semakin dipertimbangkan.

c. Teknologi Anti-pemalsuan

Teknologi anti-pemalsuan digunakan untuk mengidentifikasi produk asli dari barang palsu. Teknologi harus sulit untuk diduplikasi, sulit digunakan kembali, tetapi mudah diterapkan dan diidentifikasi secara visual, serta mudah terlihat saat dirusak. Teknologi anti-pemalsuan untuk kemasan dapat dibagi menjadi teknologi langsung atau terbuka yaitu terlihat jelas oleh konsumen dan teknologi tidak langsung atau tertutup yang tidak terlihat dengan mata telanjang. Teknologi langsung atau terbuka memungkinkan konsumen akhir untuk memverifikasi keaslian kemasan secara visual seperti penggunaan hologram, tanda air, kode batang, RFID, dan segel antirusak. Teknologi pengemasan dapat dirancang menjadi tindakan anti-pemalsuan *business-to-business* (B2B) atau *business-to-consumer* (B2C). Paling sederhana, desain kemasan dapat menggabungkan sistem bukti kerusakan seperti pembungkus film, segel dan pita susut, serta tutup yang dapat pecah atau sekali pakai.

Merek wiski menggunakan teknologi *Near Field Communication* (NFC) untuk memastikan integritas produk dan memaksimalkan kepuasan konsumen. *Tag* NFC terintegrasi dengan label dan konsumen cukup menempelkan ponsel mereka ke label botol untuk mengakses informasi produk serta merek. *Tag* diterapkan sedemikian rupa sehingga akan robek jika segel botol rusak.

Hologram sering digunakan sebagai alat autentikasi dalam produk pangan. Hologram menghasilkan pancaran seperti pelangi dengan mendifraksikan cahaya putih ke dalam spektrum cahaya yang terlihat dan memungkinkan konsumen akhir untuk melihat gambar holografik secara langsung. Hologram menawarkan lapisan penting dari perlindungan merek yang terlihat dan tidak boleh diabaikan oleh industri pangan. Salah satu contoh penggunaannya adalah Macallan Highland Single Malt Scotch Whiskey. Di masa lalu, penipu menggunakan kembali botol wiski asli dengan label utuh dan kemudian menjual produk palsu dengan nama merek mereka. Jenis penipuan ini mengarah pada penggunaan label keamanan holografik 3D yang terbukti merusak. Setelah tutupnya dilepas, label keamanan holografik akan dihancurkan. Label tersebut memiliki sifat yang terbukti merusak sehingga konsumen dapat menggunakan label ini untuk mengidentifikasi apakah wiski yang mereka beli asli atau tidak. Hologram hemat biaya dan tidak dapat disalin dengan mudah. Namun, penipu diketahui membuat hologram mereka sendiri untuk digunakan dengan produk palsu. Sementara *tag* RFID sulit untuk dipalsukan, kode batang tidak demikian. Jadi, kode batang sering digabungkan dalam tindakan anti-pemalsuan dengan teknologi seperti hologram atau tanda air dan terkadang dengan teknologi tertutup juga.

Tanda air adalah gambar atau pola yang disematkan ke dalam desain kemasan dan terlihat saat terpapar cahaya. Tanda air sering diintegrasikan ke dalam kemasan untuk memerangi produk palsu. Produsen pangan dapat menyesuaikan tanda air dengan menggunakan logo atau nama merek untuk mengautentikasi produk mereka. Tanda air visual tidak mahal, tetapi konsumen harus mengetahui

tanda air dan tahu di mana mencarinya untuk memastikan bahwa produk tersebut asli.

Teknologi tertutup memerlukan keahlian tertentu dan peralatan khusus serta teknologi tersebut sering kali tidak terlihat, misalnya tinta ultraviolet (UV) atau benang pengaman UV. Benang pengaman adalah pita plastik atau logam yang dimasukkan ke dalam serat kertas selama proses produksi. Benang pengaman hanya terlihat dalam cahaya yang ditransmisikan dan merupakan fitur yang sulit untuk diduplikasi. Serat fluoresen tidak berwarna ditambahkan selama proses produksi dan artefak fluoresen hanya dapat dilihat di bawah sinar UV.

Salah satu contoh teknologi tertutup adalah tanda air digital dan mikroteks yang tidak terlihat. Tanda air digital tak terlihat yang dikembangkan oleh FiliGrade dapat disematkan ke kemasan dan memberikan informasi produk B2C melalui aplikasi seluler yang juga memverifikasi keakuratan tanda air sehingga bisa mengidentifikasi keaslian produk. Mikroteks adalah teks atau kode yang sangat kecil yang dimasukkan ke dalam teks yang lebih besar, gambar terbuka, atau desain lain dan tidak terlihat dengan mata telanjang. Teknik ini sangat sulit untuk ditiru karena penipu tidak menyadari bahwa teknik ini ada dan memerlukan teknologi deteksi serta pencetakan yang canggih untuk digunakan.

Tinta termokromik berubah warna sebagai respons terhadap perubahan suhu. Hal ini bukan hanya ukuran anti-pemalsuan yang berguna, tetapi juga penting dalam menunjukkan penyimpanan suhu yang benar dan/atau penyalahgunaan suhu. Kemasannya dilapisi dengan tinta yang diaktifkan panas dan secara permanen berubah dari tidak berwarna menjadi peringatan warna yang kuat seperti biru, hijau, hitam, atau merah. Perubahan warna pada kemasan dapat mengidentifikasi apakah kemasan logistik eksternal telah rusak atau jika produk telah mengalami perubahan suhu yang memengaruhi kualitas produk. Keuntungan dari tinta termokromik adalah aman untuk diterapkan pada kemasan pangan dan memberikan isyarat visual yang kuat kepada konsumen. Namun, penipu mungkin me-

miliki akses ke teknologi pencetakan warna. Oleh karena itu, produsen tidak boleh mengandalkan perubahan warna sebagai satu-satunya strategi anti-pemalsuan.

Teknologi anti-pemalsuan seperti pencetakan intaglio, benang pengaman, dan teknologi fluoresensi sering digunakan untuk produk pangan. Pencetakan intaglio menggunakan garis dan titik yang sangat halus pada kemasan dan merupakan salah satu proses pencetakan yang paling sulit untuk dipalsukan. Teknologi pengemasan ini juga dapat digabungkan dalam strategi tindakan anti-pemalsuan dengan bentuk autentikasi lainnya dalam upaya bersama untuk meminimalkan risiko pemalsuan.

Konsumen yang berpengetahuan dan berpengalaman mungkin dapat membedakan yang palsu dari produk yang asli. Penikmat wiski dan kolektor berpengalaman dapat menilai label termasuk detail yang dikandungnya. Konsumen bersedia menggunakan teknologi untuk mengautentikasi sendiri produk makanan dan minuman. Penggunaan teknologi digital seperti komputasi prediktif dan aplikasi *Internet of Things* (IoT) memberi konsumen cara untuk mendeteksi penipuan di toko makanan dan agensi pribadi yang lebih besar. Sebagian besar teknik autentikasi anti-pemalsuan saat ini dirancang untuk aplikasi industri dan laboratorium. Perangkat analitis tetap atau *benchtop* dapat ditempatkan di pelabuhan utama, pusat distribusi, dan *hub* transportasi untuk menguji produk guna memverifikasi risiko pemalsuan. Penggunaan perangkat deteksi genggam yang cepat dan mudah digunakan berdasarkan spektroskopi Raman (*point-and-shoot*) untuk mendeteksi penipuan pangan. Spektroskopi Raman telah digunakan untuk menentukan properti minuman beralkohol membuat teknik yang menarik dalam menentukan keaslian produk. Pilihan lebih lanjut untuk mengembangkan teknik berbasis integritas meliputi penggunaan penanda isotop; atau penanda biologis dan kimia yang dikenal sebagai “taggan” (Lecat dkk., 2017). Taggan kimia adalah bahan jejak kimiawi yang biasanya terdeteksi oleh sistem reagen yang sangat spesifik daripada analisis konvensional sehingga sulit untuk direplikasi oleh penjahat pangan. Taggan biologis dimasukkan pada

tingkat yang sangat rendah dalam produk, pelapis, atau diterapkan pada komponen pengemasan dan identifikasi yang memerlukan kit reagen yang sangat spesifik untuk mengautentikasi produk. Dikombinasikan dengan aplikasi berbasis IoT pintar lainnya, mereka dapat memberikan tindakan anti-pemalsuan efektif yang dipesan lebih dahulu untuk produk yang bersangkutan.

4. Pemalsuan Pangan

Pemalsuan pangan memiliki sejarah panjang dan telah berubah menjadi industri global bernilai jutaan dolar bagi para penipu yang merugikan rantai pasok pangan dalam hal kehilangan pendapatan, reputasi merek, dan dalam beberapa kasus menyebabkan kematian bagi mereka yang mengonsumsi produk palsu. Insiden fatal baru-baru ini terkait dengan metanol dan bahan beracun lainnya yang digunakan dalam alkohol palsu termasuk 102 orang meninggal di India pada tahun 2015 dan 86 orang meninggal di Indonesia pada tahun 2018 (Faridz & Griffiths, 2018).

Industri Wiski Scotch menghadirkan produk yang bereputasi dan terkenal di dunia serta sering dipuja sebagai salah satu roh global premium. Sebagai produk premium, Wiski Scotch juga sangat menarik bagi pemalsu. Industri, otoritas publik, dan peneliti bekerja keras untuk mengurangi aktivitas tersebut melalui penggunaan tindakan anti-pemalsuan dan untuk mendeteksi produk palsu jika terjadi. Demikian pula, penipu sedang memikirkan cara baru dan inovatif untuk menghindari deteksi. Wilcock dan Boys (2014) menyarankan pendekatan terpadu untuk mengurangi pemalsuan dengan mengadopsi hal-hal berikut, yaitu:

- a) meningkatkan kolaborasi dan berbagi informasi intelijen dalam industri makanan dan minuman;
- b) keterlibatan dalam tindakan anti-pemalsuan oleh semua anggota rantai nilai dari karyawan, pemasok hingga konsumen, dan otoritas publik; dan
- c) peningkatan berkelanjutan dalam desain produk dan kemasan.

Langkah-langkah ini sudah diadopsi dalam industri Wiski Scotch. Pembagian intelijen antara industri, pelelang wiski, dan polisi berhasil mengungkap dan menutup operasi pembotolan alkohol ilegal (Paskin, 2017). Peningkatan kolaborasi di seluruh rantai pasok dapat membantu mendeteksi kasus pemalsuan awal dan berbagi intelijen antara industri dan Europol telah menghasilkan serangan internasional yang sukses seperti yang dilakukan selama Operasi Opson. Inisiatif-inisiatif di industri makanan dan minuman ini harus diperkuat lebih lanjut.

Pemalsuan dapat muncul sebagai akibat dari representasi yang salah dan terkait dengan produk. *Pertama*, misalnya minuman beralkohol yang diproduksi secara ilegal dan/atau di bawah standar yang digunakan untuk menggantikan produk premium. *Kedua*, misrepresentasi proses yang terkait dengan tempat atau negara asal atau perkembangan jaringan suplai ilegal. *Ketiga*, misrepresentasi pengemasan dengan pengemasan palsu atau penggunaan ilegal daur ulang botol minuman keras asli dan akhirnya kesalahan penyajian data dengan sengaja memberikan informasi palsu untuk menyertai *batch* produk. Perbaikan terus-menerus dalam jenis dan deteksi analitis akan mempersulit pelaku untuk memproduksi dan menjual wiski palsu tanpa ditemukan. Pengemasan, dan khususnya teknologi cerdas, memainkan peran utama dalam memerangi pemalsuan pangan. Teknologi pengemasan menjadi lebih canggih dan teknologi anti-pemalsuan dirancang sedemikian rupa sehingga sulit untuk ditiru. Sistem autentikasi dan ketertelusuran mampu mendukung produk. Untuk meningkatkan keamanan dan kualitas produk, dan untuk melindungi nilai merek, perusahaan makanan dan minuman harus bersiap untuk berinvestasi lebih banyak dalam memantau, menyelidiki, dan berinvestasi dalam pendaftaran dan perlindungan kekayaan intelektual serta hubungan masyarakat yang mempromosikan peran konsumen dalam menangani produk palsu. Dengan demikian, teknologi pengemasan cerdas memiliki peran kunci dalam strategi tindakan anti-pemalsuan yang lebih luas.

B. Teknologi Pengemasan Anti-pemalsuan

Pengemasan merupakan mata rantai penghubung produksi dengan pemasaran ketika barang dari pusat produksi sampai ke tangan konsumen dalam keadaan aman dan sehat dengan biaya keseluruhan yang minimum. Pengemasan juga dapat didefinisikan sebagai sistem terkoordinasi yang dapat melingkupi atau melindungi produk untuk distribusi, penyimpanan, pengawetan, transportasi, informasi, dan penjualan. Merek farmasi paling rentan karena pangsa pasar yang lebih tinggi, kemudahan produksi, dan margin keuntungan yang lebih besar. Pemalsuan adalah masalah keamanan produk. Produk teralihkan dari saluran distribusi yang tepat, dijual melewati tanggal kedaluwarsa, atau dengan modifikasi paket dikaitkan dengan masalah pemalsuan.

Pemalsuan adalah reproduksi tidak sah dari merek dagang yang sangat mirip atau identik dengan barang asli. Pertemuan internasional pertama tentang obat-obatan palsu diadakan selama 1–3 April 1992, oleh Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) di Jenewa dan menerima definisi berikut.

Obat palsu adalah obat yang dengan sengaja dan salah diberi label sesuai dengan identitas dan/atau sumbernya. Pemalsuan dapat berhubungan baik dengan produk bermerek maupun generik yang terdiri dari bahan yang benar atau salah, bahan aktif yang kurang, atau dengan kemasan palsu (WHO, 2010).

Kemudian, konsep tersebut dimodifikasi oleh Badan Nasional Nigeria untuk Administrasi dan Pengawasan Makanan dan Obat-obatan/*Nigerian National Agency for Food and Drug Administration and Control* (NAFDAC) sebagai “obat-obatan dengan jumlah bahan aktif yang sama dengan merek asli, bahan aktifnya tidak mencukupi atau tidak ada sama sekali, obat-obatan yang sudah kedaluwarsa, obat-obatan herbal yang bersifat toksik atau tidak efektif, dan obat-

obatan yang tidak mencantumkan nama dan alamat pembuatnya palsu” (NAFDAC, 2011).

Pemalsuan adalah bisnis dengan volume dan keuntungan tinggi yang menyebabkan pelanggaran hak kekayaan intelektual, undang-undang kedokteran, dan aspek hukum pidana lainnya. Pemalsuan dan pembajakan dalam istilah yang sama karena keduanya merupakan reproduksi salinan identik dari produk asli. Obat palsu yang paling umum di negara industri atau negara maju disebut obat gaya hidup. Individu sering membeli obat-obatan ini dari internet atau apotek tanpa izin. Obat palsu adalah penyebab utama morbiditas, mortalitas, dan hilangnya kepercayaan pada sistem perawatan kesehatan. Di India, konsumen melaporkan penggunaan produk palsu dan bajakan yang lebih luas melalui penggunaan kembali, perbaikan, dan pengisian ulang produk. Pengemasan ulang adalah salah satu sumber obat palsu di Eropa dan Amerika Serikat (Zurich, 2007).

1. Skenario Pasar dan Perspektif Obat

Menurut laporan penelitian BCC, teknologi pengemasan anti-pemalsuan di Amerika Serikat meningkat menjadi sekitar US\$ 34,2 miliar pada tahun 2006. Penjualan kemungkinan mencapai US\$ 43 miliar pada tahun 2012, dengan melihat tingkat pertumbuhan tahunan gabungan sebesar 3,2% selama 5 tahun rentang tahun 2007–2012, sementara sesuai pernyataan yang dikeluarkan oleh Organisasi untuk Kerjasama Ekonomi dan Pembangunan/*Economic Cooperation and Development* (OECD), tiga perempat dari obat-obatan palsu yang dipasok di seluruh dunia berasal dari India, diikuti oleh 7% dan 6% masing-masing dari Mesir dan Tiongkok. Pada tahun 2005, OECD memperkirakan perdagangan internasional barang palsu menjadi US\$ 200 miliar per tahun. Tiongkok menempati peringkat pertama untuk produk palsu, Amerika Serikat di peringkat kedua dan India di peringkat keempat secara global. WHO memperkirakan bahwa hingga 1% dari obat-obatan yang tersedia di negara maju kemungkinan besar palsu. Angka ini meningkat menjadi 10% secara global, meskipun di

beberapa negara berkembang perkiraannya adalah sekitar sepertiga untuk obat-obatan palsu.

Obat-obatan telah menjadi pusat daya tarik bagi para pemalsu karena sejumlah alasan yang tercantum dalam Tabel 9.5. dan faktor-faktor yang bertanggung jawab atas pemalsuan ditunjukkan pada Gambar 9.1. Laporan pemalsuan maksimum terkait dengan antibiotik, antiprotozoa, hormon, dan steroid. Obat-obatan yang dipalsukan di seluruh dunia dengan hasilnya disebutkan dalam Tabel 9.5.

Tabel 9.5 Obat sebagai Target Pemalsuan

Alasan Ketertarikan terhadap Obat-obatan	
a)	Tidak adanya atau lemahnya <i>National Medicines Regulatory Authorities</i> (NMRA)
b)	Harga obat yang mahal
c)	Kurangnya pengawasan terhadap obat-obatan ekspor
d)	Berdagang melalui beberapa perantara
e)	Kurangnya penuntutan dan hukuman

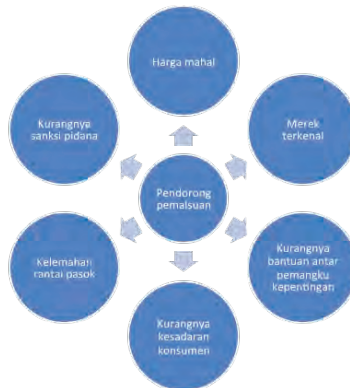
Sumber: Shah dkk. (2014)

Tabel 9.6 Kasus Pemalsuan Obat

Tahun	Negara	Dampak
1996	Haiti	Sedikitnya 59 anak meninggal setelah mengonsumsi sirup palsu yang digunakan untuk mengobati demam.
1998	Brazil	Pil kontrasepsi yang tidak efektif mengakibatkan kehamilan yang tidak diinginkan.
1998	India	Keracunan dietilen glikol menewaskan sedikitnya 30 anak.
2000	Kamboja	Sedikitnya 30 kematian akibat obat malaria palsu.
2001	Tiongkok	Berita Shenzhen melaporkan bahwa lebih dari 100.000 orang meninggal karena obat-obatan palsu pada tahun 2001.
2002	Amerika Serikat	FDA melaporkan tiga lot Combivir palsu.
2003	Amerika Serikat	Penarikan 200.000 botol obat antikolesterol (Lipitor).

Tahun	Negara	Dampak
2005	Inggris	Pabrik Viagra palsu ditemukan di London utara.
2007	Inggris	Obat antipsikotik palsu Zyprexa diketahui oleh pengemas ulang yang mengakibatkan penarikan <i>batch</i> .
2009	Ghana	Obat antimalaria palsu, Novartis, dibawa untuk diperiksa oleh seorang warga.
2009	Eropa	Lebih dari 2 juta jarum insulin palsu ditemukan di saluran distribusi Eropa yang mapan.
2009	Kenya	Obat antihipertensi dan antidiabetes palsu disita oleh pejabat Kenya.
2009	Tiongkok	Obat tradisional antidiabetes mengandung glib-enklamid enam kali lipat dari dosis normal; dua orang meninggal dan sembilan dirawat di rumah sakit.
2010	Bangladesh	Pengujian 5000 sampel mengungkapkan bahwa 300-nya palsu atau kualitas di bawah standar.
2010	Tiongkok	Sebuah rumah sakit telah membayar kompensasi kepada pasien yang menderita efek samping setelah dirawat dengan obat palsu Roche.

Sumber: Shah dkk. (2014)



Sumber: Shah dkk. (2014)

Gambar 9.1 Faktor Pendorong Pemalsuan

2. Teknik Autentikasi

Autentikasi adalah tindakan menetapkan atau menyesuaikan sesuatu sebagai asli. Autentikasi sangat penting karena penggunaan obat palsu dapat membahayakan kesehatan dan kesejahteraan pasien. Penggunaannya dapat mengakibatkan kegagalan pengobatan atau bahkan kematian. Autentikasi umumnya dilakukan baik melalui fitur terbuka maupun tertutup pada produk.

a. Fitur/Teknologi Terbuka

Fitur terbuka diharapkan dapat membantu pengguna untuk mengonfirmasi keaslian sebuah paket. Fitur-fitur tersebut akan terlihat secara signifikan dan rumit atau mahal untuk direproduksi. Mereka termasuk pelapis variabel optik dengan perubahan warna, tinta termokromik, dan tanda air. *Inkjet* umumnya digunakan untuk mencetak teks variabel pada kemasan. Prosesnya bisa tidak rapi dan tidak selalu memberikan kualitas cetak yang diperlukan untuk membuat kode kecil yang harus tetap jelas selama berminggu-minggu atau berbulan-bulan. Persyaratan untuk kode kualitas ini menyebabkan pengembangan *barcode*.

Barcode adalah kode linear atau dua dimensi berdensitas tinggi yang digabungkan ke dalam paket produk yang dipindai dan dikirim ke *database* pusat. Kode-kode ini dapat dicetak dengan metode *on-line* yang mencakup pencetakan *inkjet* atau digital. Teknologi laser dapat menghasilkan gambar kecil berkualitas tinggi dan *barcode* dua dimensi. Pengguna harus memastikan bahwa ada kontras cetak yang cukup antara bilah terang dan gelap untuk menghasilkan representasi yang dapat dibaca. Namun hingga kini, bahkan *barcode* berkualitas tinggi pun mudah direplikasi.

Holografi terkenal karena kemampuannya menghasilkan gambar tiga dimensi yang mencolok, yang sulit dicapai dengan fotografi konvensional. Manfaat utama dari proses ini adalah bahwa mereka dapat direformasi di bawah cahaya putih. Hologram dihasilkan dari pola interferensi yang diperoleh melalui kontak sinar laser dengan gambar sudut atau teknologi laser. Hologram definisi tinggi tersebut

digunakan sebagai fitur keamanan pada botol produk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.2. Kompleksitas hologram bervariasi dari gambar tiga dimensi tradisional hingga pola difraksi dua dimensi yang dihasilkan komputer. Hologram sekarang tersedia secara luas dalam berbagai format seperti hologram *shrink sleeves*, aluminium foil kemasan blister, segel tutup induksi holografik, label bukti tamper berbasis poliester, dan *hot stamping foil hologram*. Akan tetapi, tetap saja dilaporkan bahwa lebih dari setengah penjualan obat artesunate di Asia Tenggara dipalsukan, meskipun ada hologramnya. Kelebihan dan kekurangan teknologi terbuka dijelaskan dalam Tabel 9.7.



Sumber: Labels & Labelling (2020)

Gambar 9.2 Botol dengan Hologram sebagai Fitur Keamanan

b. Fitur Tertutup (Tersembunyi)

Alasan fitur tertutup adalah untuk membantu pemilik merek mengenali produk palsu. Masyarakat umum tidak akan menyadari kehadirannya dan tidak akan memiliki sumber daya untuk mengonfirmasinya. Sebuah fitur tertutup harus sulit untuk disalin tanpa pengetahuan khusus. Fitur tertutup termasuk partikel mikroskopis warna tertentu dan label yang dicetak dengan kombinasi warna.

Teknologi yang sangat dihargai meskipun mahal yang digunakan saat ini adalah perangkat identifikasi frekuensi radio (RFID). *Tag* RFID terdiri dari antena dengan *microchip* di tengahnya. Tidak seperti

barcode, RFID mencakup informasi *batch* yang dapat diakses dari jarak jauh tanpa memerlukan garis pandang. RFID memungkinkan pengenalan objek melalui komunikasi nirkabel dalam pita frekuensi yang ditetapkan. Tiga komponen penting dalam sistem RFID adalah *tag*, pembaca, dan perangkat lunak. *Tag* adalah sirkuit terpadu yang berisi pemverifikasi pelacakan eksklusif, yang disebut kode produk elektronik/*electronic products code* (EPC), yang ditransmisikan melalui gelombang elektromagnetik dalam spektrum radio. Pembaca menangkap sinyal yang ditransmisikan dan menyediakan konektivitas jaringan. Untuk melacak penggunaan, *tag* RFID yang digunakan adalah aktif, pasif, dan semiaktif. Tingginya biaya *tag* RFID (20–50 sen dibandingkan dengan *barcode* 2 sen) mungkin menghambat perusahaan dari penggunaan *tag* RFID.

Sidik jari biometrik yang diperkenalkan oleh grup Bayer menggunakan laser dioda 1 mW untuk menganalisis susunan permukaan bawaan setiap item. Penyimpangan mikroskopis yang didukung oleh pengaturan serat kertas atau plastik mengakibatkan penyebaran sinar laser oleh peristiwa bintik laser. Dengan mengukur penyebaran cahaya di berbagai sudut, keunikan permukaan dicatat. Autentikasi permu-

Tabel 9.7. Keuntungan dan Kerugian dari Teknologi Terbuka dan Tertutup

Teknik	Kelebihan	Kekurangan
Terbuka	<ol style="list-style-type: none"> 1) Dapat diverifikasi oleh pengguna 2) Dapat menambahkan daya tarik dekoratif 3) Dapat menjadi pencegah para pemalsu 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Memerlukan edukasi pengguna 2) Dapat menambah biaya
Tertutup	<ol style="list-style-type: none"> 1) Dapat sederhana dan biaya rendah untuk diterapkan 2) Tidak memerlukan persetujuan peraturan 3) Dapat dengan mudah disematkan atau dimodifikasi 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Perlu kerahasiaan yang ketat 2) Jika dikenal atau digunakan secara luas, mungkin mudah untuk disalin 3) Opsi yang lebih aman menambah kerumitan dan biaya

Sumber: Shah dkk. (2014)

kaan laser yang dikombinasikan dengan *tag* RFID dapat memberikan solusi anti-pemalsuan secara keseluruhan. Kelebihan dan kekurangan teknologi tersembunyi dijelaskan pada Tabel 9.7.

3. Komponen Penjamin Keamanan

Autentikasi dalam kemasan terutama menggunakan konsep penyegel yang telah ditunjukkan secara signifikan oleh *American Bank Note Holographics*. HoloSeal™ adalah label keamanan holografik peka tekanan yang dipatenkan dan menampilkan pola patahan, sistem verifikasi cahaya hitam, dan kode tertanam yang dapat dibaca mesin. Untuk tujuan pelacakan, HoloSeal dapat diberi nomor atau dipersonalisasi untuk memberikan akun wilayah, pabrik, atau produk. HoloCap terdiri dari beberapa film penyegel panas berbeda yang dipasang langsung ke kemasan menggunakan teknologi segel induksi. Film yang berbeda ini bersatu untuk membentuk segel dalam holografik tunggal yang memberikan tingkat pertahanan yang lebih tinggi untuk wadah atau botol.

Tren penggunaan penyegel dalam kemasan untuk pengembangan teknik anti-pemalsuan berubah dengan konsep laser dan pendekatan forensik. Holospot® adalah pembawa informasi anti-pemalsuan diskrit yang dapat disematkan ke produk apa pun. Hal ini menggunakan enkripsi laser dari litogram yang dihasilkan komputer sehingga menjadi pembawa data polimer kecil dan menawarkan beberapa fitur keamanan terbuka dan tertutup. Sedangkan di sisi lain, Ident Seal® adalah teks yang terlihat atau kode batang kontras yang ditulis oleh laser. Hal ini menawarkan perlindungan terbuka, identifikasi, dan fitur bukti perusakan. Label anti-pemalsuan Forge Guard dari Fujifilm Corporation dapat memvisualisasikan gambar atau teks penuh warna dengan jelas dengan penampil khusus. Label ini mengatur panjang gelombang cahaya pada tingkat nano-optik sehingga mereka dapat melihat gambar penuh warna yang tersembunyi. Cara ini membuat label sulit dipalsukan. Masih dibutuhkannya substrat tak kasat mata untuk meningkatkan keamanan dan penelitian yang mengarah pada pengembangan penanda forensik. Penanda forensik ini termasuk

penanda fisik, kimia, dan biologis. Sebuah produk Merck, ESAN, menampilkan banyak fitur keamanan tersembunyi dan forensik pada kemasan dari lini produk Securalic-nya. Fitur keamanan dibangun ke dalam elemen desain daun ivy yang tercetak pada kotak terlipat. Produk Securalic ini juga digunakan untuk blister dua warna dalam flexoprinting UV.

Sistem lain termasuk sistem pengemasan yang mudah rusak, pembungkus film, dan tutup yang dapat pecah. Fitur bukti kerusakan membantu menjaga integritas produk obat dengan mencegah keuntungan pemalsu, baik dengan mengemas ulang atau menjual kembali produk farmasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.3. Pembungkus film adalah film transparan dengan desain karakteristik yang tertutup rapat di sekitar produk atau wadah produk. Film harus dipotong atau robek untuk membuka wadah dan mengeluarkan produk. Pilihan substrat termasuk film *ultradestructible*, kertas sensitif pelarut, dan film *voidable* yang memberikan gambar saat dilepas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.4. Tutup yang dapat pecah, seperti namanya, pecah ketika upaya untuk membuka dilakukan. Tutup ini memberikan bukti kerusakan eksternal juga dapat dikombinasikan dengan segel internal sehingga membantu keamanan ganda. Pilihan keseluruhan teknik anti-pemalsuan di berbagai tingkat kemasan telah dijelaskan pada Tabel 9.8.



Sumber: Packing Supply (2018)

Gambar 9.3 Fitur Bukti Kerusakan Eksternal dan Internal



Sumber: Wikimedia Commons (2020)

Gambar 9.4 Label yang Meninggalkan Tanda Kosong pada Gangguan

Tabel 9.8 Pilihan Solusi Anti-pemalsuan pada Tingkat Kemasan yang Berbeda

Teknologi Antipemalsuan	Paket Penjualan Utama	Paket Grup Sekunder	Paket Transportasi
Desain kemasan	Ya	Tidak	Tidak
Pencetakan dan Grafik	Ya	Ya	Tidak
Label	Ya	Tidak	Ya
Bukti Kerusakan	Ya	Ya	Ya
Penanda Forensik	Ya	Tidak	Tidak

Sumber: Shah dkk. (2014)

Dengan demikian, obat-obatan menyelamatkan nyawa dan mencegah penyakit serta epidemi hanya jika obat tersebut aman, berkhasiat, berkualitas baik, dan digunakan secara rasional. Penggunaan obat-obatan yang tidak aman, di bawah standar, tidak efektif, dan palsu dapat membahayakan kesehatan pasien. Pemerintah di negara mana pun harus membentuk badan pengatur obat-obatan nasional untuk memantau kualitas obat di pasar untuk mendeteksi dan mencegah obat-obatan di bawah standar dan palsu sampai ke masyarakat, dengan bekerja sama dengan lembaga penegak hukum nasional seperti polisi dan petugas bea cukai. Badan ini harus memastikan bahwa semua aktivitas manufaktur, impor, ekspor, dan distribusi obat dilakukan di tempat yang disetujui oleh mereka dan

individu serta perusahaan yang terlibat harus memiliki lisensi untuk menjalankan aktivitas tersebut.

Penerapan teknik terbuka dan tertutup oleh industri dapat meningkatkan standar bagi para pemalsu, tetapi kesadaran terakhir harus berada di tingkat konsumen. Konsumen harus membeli obat hanya dari apotek dan toko obat berlisensi, curiga terhadap obat-obatan yang didiskon besar-besaran, dan memeriksa apakah kemasan menunjukkan nomor *batch*, tanggal pembuatan, tanggal kedaluwarsa, dan nama produsen. Obat palsu tidak hanya memengaruhi konsumen yang sakit dan tidak bersalah, tetapi juga masyarakat umum dan patut mendapat perhatian lebih.

C. Pemalsuan Pangan: Kekhawatiran yang Bertumbuh

Pemalsuan pangan tidak hanya berdampak negatif baik dari segi ekonomi maupun keselamatan konsumen. Produsen bisa mengalami kerugian jika produk mereka dipalsukan dan dijual dengan harga jauh lebih murah. Sementara dari sisi konsumen, mereka membeli produk palsu yang berisiko merugikan kesehatan. Namun, dalam subbab ini, pemalsuan pangan dibahas melalui pelanggaran hak kekayaan intelektual dan dampaknya dari aspek hukum, keselamatan konsumen, maupun kerugian ekonomi.

1. Pemalsuan dan Hak Kekayaan Intelektual

Ketika berhadapan dengan undang-undang dan peraturan, istilah “pemalsuan” memiliki aplikasi yang sangat spesifik untuk hak kekayaan intelektual (HKI). Hak Kekayaan Intelektual (HKI) adalah

Hak yang diberikan kepada orang atas ciptaan pikirannya (mereka biasanya memberikan pencipta hak eksklusif atas penggunaan ciptaannya untuk jangka waktu tertentu) (WTO, 1994).

HKI terdiri dari empat kategori: merek dagang, paten, hak cipta, dan rahasia dagang. Berikut definisi empat kategori tersebut.

- a. Merek dagang: simbol, kata, atau kata-kata yang terdaftar secara sah atau ditetapkan dan digunakan untuk mewakili perusahaan atau produk. Salah satu jenis merek dagang adalah indikasi geografis, yaitu jenis merek dagang yang mengidentifikasi lokasi asal seperti negara atau wilayah.
- b. Paten: hak atau kepemilikan untuk jangka waktu tertentu, terutama hak tunggal untuk mengecualikan orang lain dari membuat, menggunakan, atau menjual suatu penemuan. Sementara itu, *trade dress* adalah kombinasi antara merek dagang dan paten yang melindungi penggunaan suatu bentuk, gambar, atau dekorasi yang mewakili perusahaan atau produk.
- c. Hak Cipta: hak hukum eksklusif yang diberikan kepada pencetus atau penerima hak untuk mencetak, menerbitkan, menampilkan, memfilmkan, atau merekam materi sastra, seni, atau musik dan untuk memberi wewenang kepada orang lain untuk melakukan hal yang sama.
- d. Rahasia Dagang (Perlindungan Informasi yang Tidak Diungkapkan): perangkat atau teknik rahasia yang digunakan oleh perusahaan dalam membuat produknya.

Seperti yang didefinisikan oleh Organisasi Standar Internasional (ISO), pemalsuan adalah “barang material yang meniru atau menyalin barang material asli” dan definisi barang material adalah “produk yang diproduksi, dikembangkan, atau yang diambil dari alam” (ISO, 2018). Selain itu, barang material autentik adalah “barang material yang diproduksi di bawah kendali produsen yang sah, pencipta barang, atau pemegang hak” (ISO, 2018). Kemudian, pemegang hak adalah “badan hukum baik yang memegang atau berwenang menggunakan satu atau lebih hak kekayaan intelektual” (ISO, 2018). Konsep pemalsuan biasanya dikaitkan dengan merek dagang atau logo barang material. Istilah terkait adalah pembajakan yang biasanya diterapkan

pada pelanggaran hak cipta atau paten untuk karya yang diterbitkan seperti buku, lagu, atau film.

Untuk mempertimbangkan tantangan penuh dalam mengamankan perlindungan HKI yang sah, penting untuk meninjau lebih lanjut konsep-konsep seperti HKI yang “terdaftar secara sah” jika ada undang-undang yang melarang pembuatan produk yang melanggar HKI atau mungkin hanya ilegal untuk diekspor. Selain itu, perlu juga mempertimbangkan hukum dan prioritas penegakan hukum bagi negara pengimpor. Definisi disertakan dengan penekanan ditambahkan karena setiap poin sangat penting dalam perlindungan hukum.

- a) Barang Merek Dagang Palsu: setiap barang, termasuk kemasan, yang tanpa izin memuat merek dagang yang identik dengan merek dagang yang terdaftar secara sah sehubungan dengan barang tersebut, atau yang tidak dapat dibedakan dalam aspek esensial dari merek dagang tersebut, yang dengan demikian melanggar hak pemilik merek yang bersangkutan menurut hukum negara pengimpor.
- b) Barang Hak Cipta Bajakan: setiap barang salinan yang dibuat tanpa persetujuan dari pemegang hak atau orang yang diberi kuasa oleh pemegang hak di negara produksi dan dibuat secara langsung atau tidak langsung yang pembuatan salinan itu merupakan pelanggaran hak cipta atau hak terkait menurut hukum negara pengimpor.

Dalam beberapa kasus, mungkin tidak ilegal untuk memproduksi produk di satu negara dan produksi hanya ilegal jika diimpor oleh negara lain. Jika produk tersebut tidak pernah diekspor atau diimpor, mungkin tidak ada pelanggaran HKI yang sah. Dalam kasus lain, apa yang ilegal di satu negara mungkin tidak ilegal di negara lain. Untuk menghindari penyitaan bagian paling mahal dari harga barang oleh agen pabean, para pemalsu dapat mengimpor bahan “asli, generik” atau barang jadi dan kemudian mengirim paket kecil komponen merek dagang palsu seperti label dan tanda. Komponen tersebut dapat dirakit

di dalam suatu negara untuk menghindari penyelidikan pabean dan mengurangi jumlah produk yang akan disita dalam penggerebekan.

Mempertimbangkan tantangan lain, perlindungan rahasia dagang itu penting, tetapi jauh lebih sulit untuk dikendalikan. Dalam beberapa kasus, pemegang hak dapat mencoba untuk melindungi HKI melalui perjanjian kerahasiaan daripada mendaftarkan paten atau hak cipta untuk menghindari pengungkapan publik yang diperlukan yang akan menempatkan informasi sensitif dalam wilayah publik—pemalsu dapat menemukan petunjuk rinci untuk memalsukan produk. Selain itu, istilah “palsu” dan “tiruan” kadang-kadang digunakan, tetapi harus dihindari karena tidak memiliki definisi formal sehingga dapat menyebabkan kebingungan.

Pada titik ini, penting untuk menetapkan bahwa insiden kriminal atau kesehatan masyarakat yang terkait dengan pangan ditangani di bawah dua jenis undang-undang yang terpisah: makanan atau barang material. Sebuah “hukum pangan” biasanya berfokus pada produksi, manufaktur, dan distribusi yang aman dan terjamin berdasarkan prioritas untuk meminimalkan ancaman kesehatan masyarakat. Di sisi lain, undang-undang “barang material” berfokus pada aspek lain dari produk, seperti pelanggaran pemalsuan merek dagang yang niatnya sering kali diperlukan untuk kesalahan atau penuntutan.

Hukum pidana diberlakukan dari perspektif makanan/kesehatan masyarakat dan kemungkinan besar menghasilkan penarikan produk dari pasaran. Penarikan kembali ini penting untuk mengurangi ancaman kesehatan masyarakat, tetapi sekarang menyebabkan penyelidikan kriminal menjadi sangat menantang karena penjahat diubah dan bukti (produk palsu) ditarik kembali atau dihancurkan oleh penjahat. Prioritas pemerintah dan penegakan hukum adalah keselamatan publik (narkoba, senjata api, kekerasan), kesehatan masyarakat, kejahatan ekonomi skala besar yang mengganggu pasar atau pemerintahan, kemudian kejahatan ekonomi, dan kemudian pelanggaran yang hanya bersifat teknis. Pangan palsu yang mengancam kesehatan masyarakat akan masuk dalam kategori “kesehatan masyarakat” dan dengan demikian didahulukan sebelum kejahatan ekonomi.

Mengenai penerapan undang-undang HKI, penuntutan kasus biasanya kompleks karena sering kali “dua keadaan pikiran” perlu dibuktikan yang mencakup “perdagangan barang palsu yang disengaja” dan “mengetahui penggunaan merek palsu” (Hilliard dkk., 2007). Jika penggugat dapat membuktikan bahwa mereka tidak mengetahui bahwa produk tersebut palsu, “ini meniadakan penerapan undang-undang palsu” (Hilliard dkk., 2007).

Contoh investigasi penipuan pangan yang khas adalah OPSON, Operasi Interpol-Europol. Operasi tahunan ketujuh mencakup lebih dari 50 negara dan lebih dari 20 perusahaan. Cakupannya menyeimbangkan dampak ekonomi sementara prioritasnya adalah pada ancaman kesehatan masyarakat yang paling parah. Fokus pada kesehatan masyarakat dibuktikan di beberapa negara seperti Austria, termasuk antarlembaga penegak (polisi-penegak hukum, bea cukai, dan *Food Administration Vienna* sebagai agen pangan). Sedangkan negara lain seperti Denmark dan AS hanya menyertakan agen pangan (Administrasi Hewan dan Pangan sebagai agen makanan Denmark dan Administrasi Pangan dan Obat—agen pangan Amerika Serikat). Prioritas dan peserta yang ditetapkan tecermin dalam upaya dan hasil penyitaan: penipuan konsumen (26% salah label minyak zaitun *extra virgin*), keamanan pangan (22% pelanggaran terkait kondisi penyimpanan barang), pelanggaran fiskal (19% bea Alkohol), dan akhirnya pemalsuan Hak Kekayaan Intelektual (HKI) (1%).

Pemalsuan HKI juga adalah salah satu jenis penipuan pangan dalam hierarki bahan pencampur (dilusi, substitusi, penyembunyian), *mislabeling/misbranding*, produksi/pencurian/pengalihan pasar gelap, dan pemalsuan (Spink dkk., 2013). Penilaian kerentanan penipuan pangan secara keseluruhan dapat mempertimbangkan pemalsuan dan mengoordinasikan penanggulangan dan sistem kontrol dalam strategi pencegahan penipuan pangan. Sementara tantangan untuk mendefinisikan dan menuntut pemalsuan telah disajikan, tinjauan tersebut menekankan efisiensi penerapan konsep pencegahan kejahatan untuk tidak mencoba “menyita produk”, tetapi untuk mencoba “mencegah terjadinya penipuan pangan”.

2. Pemalsuan HKI Pangan

Besarnya dampak ekonomi dari pemalsuan dan pembajakan sangat menantang untuk diperkirakan sampai-sampai mungkin tidak mudah bahkan untuk mencoba membuat perkiraan yang signifikan secara statistik. Meskipun tidak ada perkiraan yang sangat akurat atau tepat, umumnya diyakini bahwa untuk semua produk pemalsuan bernilai ratusan miliar dolar. Secara keseluruhan, ada perkiraan bahwa definisi yang luas dari pemalsuan setara dengan “5%–7%” dari perdagangan dunia, dengan beberapa perkiraan farmasi di atas 10% di seluruh dunia dan pasar individu lainnya jauh di atas 50%.

Sebuah studi tentang dampak ekonomi dari pemalsuan dan pembajakan menemukan bahwa perkiraan kuantitatif didasarkan pada tiga dokumen referensi inti, termasuk Kamar Dagang Internasional, laporan OECD, dan siaran pers dari Biro Investigasi Federal AS. Masing-masing dokumen ini didasarkan pada perkiraan kualitatif seperti “5%–7% dari perdagangan dunia” dan diulang begitu sering sehingga perkiraan mencapai “perawakan mitologis bahkan di antara para akademisi” (Spink & Levente Fejes, 2012). Ada asumsi bahwa karena perkiraan itu diulang berkali-kali, maka harus didasarkan pada metodologi statistik dan pengumpulan data yang baik. Meskipun ini mungkin keyakinan, referensi inti jelas dalam pernyataan mereka. Misalnya, dalam laporan OECD, dinyatakan: “Sejauh mana produk dipalsukan dan dibajak tidak diketahui dan tampaknya tidak ada metodologi yang dapat digunakan untuk mengembangkan perkiraan keseluruhan yang dapat diterima” (OECD, 2008).

Kantor Akuntabilitas Pemerintah AS/*The U.S. Government Accountability Office* (GAO) menerbitkan “Pengamatan pada Upaya untuk Mengukur Efek Ekonomi Barang Palsu dan Bajakan” yang awalnya ditentukan untuk menetapkan perkiraan dampak ekonomi (GAO, 2010). Laporan GAO meninjau perkiraan global dan menyimpulkan bahwa data untuk perkiraan sebelumnya tidak dievaluasi atau dikumpulkan secara sistematis dan “bergantung secara berlebihan pada informasi yang terpisah-pisah dan bersifat anekdot; ketika data kurang, pendapat yang tidak berdasar sering diperlakukan sebagai

fakta” (GAO, 2010). GAO menyatakan bahwa mengukur pemalsuan secara keseluruhan “sulit, jika bukan tidak mungkin” (GAO, 2010). Mereka juga menyatakan, “Seorang ahli mencirikan upaya untuk mengukur dampak ekonomi secara keseluruhan dari pemalsuan nampak ‘tidak membuahkan hasil’”, sementara yang lain menyatakan bahwa perkiraan apa pun sangat mencurigakan karena ini adalah perdagangan rahasia dan semuanya adalah “dugaan” (GAO, 2010).

Jadi, untuk pemalsuan pangan—dan untuk penipuan pangan secara keseluruhan—membuat perkiraan dampak ekonomi yang tepat secara metodologis, akurat, dan tepat mungkin tidak mungkin. Namun, mengingat fokus umum pada kerentanan, kurangnya perkiraan yang sulit bukanlah masalah kritis dan bahkan bukan halangan. Fokus pada kerentanan dan “peluang penipuan” tidak memerlukan banyak data, tetapi membutuhkan wawasan yang lebih dalam tentang jenis penipuan, jenis penipu, dan insiden aktual. Upaya ini pertama-tama perlu tinjauan jenis pasar dan produk yang dipalsukan.

Inisiatif pencegahan penipuan pangan yang dipimpin industri berfokus pada kerentanan—baik dalam menilai masalah juga untuk memilih penanganan risiko—sehingga kurangnya dampak ekonomi ini bukanlah tantangan yang tidak dapat diatasi. Ketika menjawab pertanyaan ini untuk produk pangan, laporan OECD (2008) menyatakan “Sayangnya, survei tersebut hanya memberikan sedikit penjelasan tentang besarnya dan cakupan sebenarnya dari pemalsuan di sektor makanan dan minuman. Sebagian alasannya adalah bahwa tampaknya ada kesalahpahaman yang meluas di sektor ini tentang apa yang sebenarnya dicakup oleh pemalsuan (seperti HKI versus semua penipuan)”.

Kebingungan dalam klasifikasi termasuk ketika ada penyebutan “pangan palsu”. Misalnya, laporan “penyitaan pemalsuan (pelanggaran merek dagang) stroberi segar, kayu manis, dan minyak kelapa” mendefinisikan pelanggaran sebagai merek dagang dari merek dan bukan produk itu sendiri. Stroberi palsu, kayu manis, dan minyak kelapa sebenarnya adalah stroberi, kayu manis, dan minyak kelapa, tetapi nama mereknya digunakan tanpa izin.

Barang-barang material palsu dapat dibagi menjadi kategori menipu dan tidak menipu:

- a. Barang-barang material palsu yang diproduksi dengan tujuan untuk menipu konsumen.
- b. Barang palsu yang tidak menipu tidak dimaksudkan untuk menipu konsumen—dalam banyak kasus, produk dipromosikan sebagai ‘palsu’ atau ‘tiruan’.

Pasar gelap adalah pasar ilegal untuk barang-barang yang dikendalikan atau dilarang oleh pemerintah, seperti pasar gelap tanah untuk obat resep. Pasar gelap adalah pasar tempat penjual menggunakan metode legal, tetapi terkadang tidak etis untuk menghindari rantai distribusi produsen dan dengan demikian menjual barang (terutama barang impor) dengan harga (biasanya) lebih rendah daripada yang dibayangkan oleh produsen. Untuk diketahui, perdagangan paralel atau pengalihan adalah penjualan barang dengan merek dagang sah yang diproduksi di luar negeri dan diimpor ke negara lain untuk bersaing dengan barang produksi dalam negeri yang menyanggah merek dagang sah yang sama.

Untuk produk pangan, konsumen mungkin mencari penawaran yang bagus, tetapi mereka—terlepas dari jenis pasarnya—hampir secara universal mencari produk asli. Untuk mengatasi semua jenis pemalsuan dan untuk semua produk, “Dampak Ekonomi dari Pemalsuan dan Pembajakan” diterbitkan oleh OECD. Survei industri mereka mencakup beberapa wawasan yang berkaitan dengan industri pangan.

- a. Insiden pelanggaran jauh lebih rendah ketika pemalsuan fisik diperlukan untuk memberikan gambaran yang salah tentang produk (berlawanan dengan hanya menyalin kemasan, pelabelan, merek dagang, dan tampilan umum barang yang diganti).
- b. Pemalsuan fisik produk menipu yang memiliki deteksi konsumen tinggi lebih sulit karena “ini membutuhkan perusahaan yang jauh lebih canggih untuk berhasil melakukan substitusi dan

- meyakinkan pengecer serta masyarakat pembeli bahwa mereka adalah barang asli”.
- c. Misalnya, pemalsuan makanan beku atau kalengan jauh lebih sulit (daripada pemalsuan produk lain, seperti barang mewah atau pakaian jadi] karena ini akan memerlukan peralatan khusus untuk memproduksi barang pengganti, serta untuk menyimpan dan mengangkutnya, dan ini sangat mengurangi potensi insentif untuk pemalsuan.
 - d. Dalam pengalaman industri, produk yang paling rentan terhadap tindakan pemalsuan adalah produk yang paling sederhana untuk diganti dengan produk pengganti dan produk penggantinya tidak akan mudah dideteksi oleh konsumen (dan terkadang pedagang grosir dan pengecer). Teh, nasi, dan vodka adalah contoh barang-barang yang disediakan oleh responden survei OECD.
 - e. Beberapa responden mencatat bahwa pemalsuan dan pelanggaran merek dagang dalam pangan relatif rendah dibandingkan dengan produk lain karena margin keuntungan yang umumnya rendah dan tantangan logistik yang signifikan terkait dengan produksi, penanganan, transportasi, dan distribusi produk pangan.
 - f. Tantangan karakteristik manufaktur pangan akan semakin diperbesar untuk produk yang mudah rusak yang memerlukan penanganan dan rantai distribusi yang lebih canggih dan mampu menangani produk ini secara efisien.

Jadi, jenis pemalsu “profesional” (yang hanya berfokus pada pemalsuan sebagai profesi mereka) akan menemukan pemalsuan HKI pangan lebih menyulitkan daripada produk lain karena margin yang lebih rendah, produk yang mudah rusak, kualitas tinggi yang diperlukan untuk menipu konsumen bahwa yang palsu adalah nampak seperti produk asli, tantangan untuk memasukkan produk palsu ke dalam rantai pasok yang sah, tantangan untuk mendapatkan begitu banyak bahan mentah, dan peralatan manufaktur khusus.

Dengan demikian, hak kekayaan intelektual produk pangan palsu merupakan ancaman yang signifikan dengan strategi pencegahan

yang sangat menantang. Untungnya, penilaian kerentanan penipuan pangan yang dipimpin industri dan upaya strategi pencegahan penipuan pangan, termasuk pemalsuan HKI sebagai “jenis penipuan” dan mengintegrasikan penanggulangan serta sistem kontrol di seluruh perusahaan, sudah mulai diupayakan. Ketika seluruh rangkaian risiko pangan dipertimbangkan, ada manfaat dari upaya lain—seperti pemeriksaan kontrol kualitas acak di pasar yang membantu mengurangi peluang penipuan untuk pangan palsu. Fokus strategi pencegahan penipuan pangan ini sudah mencakup teori kriminologi seperti pencegahan kejahatan situasional yang sudah mempertimbangkan ancaman produk palsu. Upaya anti-pemalsuan paling efisien diterapkan jika dipertimbangkan dalam hierarki semua penipuan dan semua produk.

D. Studi Kasus: Albania dan Indonesia

1. Teknologi Anti-pemalsuan di Industri Pangan Albania

Albania menjadi salah satu contoh negara yang menerapkan teknologi anti-pemalsuan untuk industri pangan dan disertai instrumen hukum yang mendukung. Mampu melacak pangan kembali ke asal-usulnya dan untuk membuktikan keasliannya dapat menjadi sangat penting bagi pemerintah dan industri selama terjadi wabah terkait pangan. Perusahaan pangan mungkin mendapat manfaat dari ketertelusuran dan pemerintah pada akhirnya dapat menuntutnya. Namun, sebagian besar ketertelusuran dan keaslian adalah tentang membangun hubungan dengan konsumen dan memberi mereka apa yang benar-benar mereka inginkan, yaitu kemampuan untuk percaya bahwa mereka tahu apa yang mereka makan. Dalam konteks ini, konsumen harus yakin dengan pilihan pangan mereka dan dapat membeli sesuai dengan kebutuhan. Mengetahui apa yang ada dalam pangan mereka dan dari mana asalnya terdengar cukup sederhana, tetapi keterlacakan rantai pangan dan keaslian pangan adalah masalah dunia yang kompleks. Hal ini membutuhkan standar yang konsisten dan teknologi yang me-

madai di dunia yang terus berubah. Di negara-negara Uni Eropa (UE), Amerika Serikat, dan Jepang, keaslian produk dikontrol dan diatur secara luas oleh undang-undang dan standar. Tiga skema mengatur indikasi geografis dan spesialisasi tradisional untuk produk pertanian. Regulasi UE 1151 dan pedoman komisi UE (2014) mendefinisikan Penunjukan Asal yang Dilindungi/*Protected Designation of Origin* (PDO), Indikasi Geografis yang Dilindungi/*Protected Geographical Indication* (PGI), dan Jaminan Keistimewaan Tradisional/*Traditional Specialty Guaranteed* (TSG), untuk memastikan keaslian hidangan dan pangan khas daerah. PDO adalah perlindungan hukum untuk merek produk yang karakteristiknya tergantung, terutama atau secara eksklusif, pada wilayah produksi. PGI menunjukkan tanda asal pada produk pertanian dan pangan dengan kualitas tertentu, baik dari asal geografis produk maupun dari area pengolahan, penyiapan, atau pembuatan. Terakhir, TSG dirancang untuk mengatur produk dengan komposisi tradisional atau diproduksi sesuai tradisi lokal (Benelux Office for Intellectual Property, 2020). Undang-undang yang terkait dengan skema ini memastikan keaslian produk yang berasal dari UE serta menghilangkan persaingan tidak sehat dan produk yang tidak diatur dengan kualitas lebih rendah atau dengan pengganti yang tidak sesuai dengan persyaratan produk asli.

Di UE, perlindungan merek suatu produk diatur dan dikendalikan oleh tiga standar (PDO, PGI, dan TSG) yang juga memastikan produk pangan yang aman dan berkualitas. Salah satu komponen produk pangan yang “aman” adalah ketertelusurannya. Peraturan Komisi Eropa (2002) mendefinisikan prinsip dan kewajiban hukum yang harus dipatuhi oleh setiap entitas, yang mengirimkan atau memproduksi produk pangan, termasuk sistem ketertelusuran. Semua entitas dalam industri pangan, yang telah menerapkan sistem ketertelusuran, harus dapat mengidentifikasi siklus hidup produk mereka dari satu titik dalam rantai pasok ke titik lainnya (termasuk bahan mentah, identifikasi bahan, identifikasi tempat, dan pergerakan produk). Namun, persyaratan ketertelusuran tidak berlaku untuk entitas yang menjual produk akhir langsung kepada konsumen.

Di Albania, *National Food Authority* (NFA) awalnya dibentuk pada tahun 2007. Dibantu oleh ahli asing dan dana UE, otoritas tersebut secara resmi diperkenalkan pada 20 Mei 2010, didukung oleh keputusan Dewan Menteri. Saat ini, lembaga tersebut mencakup 12 wilayah di Albania dengan cakupan nasional. Tujuan dari lembaga ini adalah untuk mengawasi keamanan pangan di Albania dan memenuhi persyaratan Perjanjian Stabilisasi dan Asosiasi yang ditandatangani antara UE dan Pemerintah Albania. Dalam aspek sosial, pembentukan NFA memberikan hak kepada warga negara Albania untuk mengonsumsi produk yang aman seperti yang dikonsumsi oleh warga negara-negara anggota Uni Eropa. Komisi Eropa (EC) membantu melalui proyek CARDS (*Community Assistance for Reconstruction, Development, and Stabilization*/Bantuan Masyarakat untuk Rekonstruksi, Pembangunan, dan Stabilisasi) dalam pembentukan dan menentukan fungsi NFA. Hal ini dilakukan sesuai dengan model terbaik negara-negara anggota UE yang cocok dengan fitur administratif, hukum, demografis, dan masalah keamanan pangan di Albania. UE mendukung konsolidasi NFA lebih lanjut dalam program IPA (*Instrument for Pre-Accession Assistance*) untuk tahun 2010–2013. Program ini telah mencanangkan sejumlah proyek yang mendukung komponen keamanan pangan, produk keamanan yang bukan berasal dari hewan, dan lain-lain.

Langkah penting lainnya dalam menyelaraskan undang-undang Albania dengan undang-undang UE adalah pengesahan Undang-Undang 9863 tentang pangan. Undang-undang ini menetapkan standar umum mutu pangan, pelabelan pangan, pendaftaran indikasi geografis, dan pelabelan asal yang diawasi. Hal ini menentukan definisi untuk “pelacakan” sebagai kemampuan untuk melacak dan mengikuti pangan, pakan, hewan yang menghasilkan pangan, atau zat tertentu yang diharapkan terkait dengan pangan atau pakan, pada semua tahap produksi, pengolahan, dan distribusi. Undang-undang ini mencakup kemampuan untuk melacak dan mengikuti impor bahan baku untuk produksi pangan, penyimpanan, pengangkutan dan penjualan, atau penyediaan konsumen akhir. Pelaku usaha pangan dimaksudkan un-

tuk membangun sistem pemeliharaan data (misalnya *database*), untuk menjamin prosedur yang memungkinkan identifikasi mereka setiap saat. Operator ini harus menyimpan informasi ini selama tiga tahun. Indikasi geografis adalah nama daerah, tempat tertentu atau, dalam hal luar biasa, nama negara yang digunakan untuk menggambarkan pangan yang 1) berasal dari daerah, tempat tertentu atau tempat penggunaan atau 2) memiliki ciri khas kualitas, reputasi atau beberapa fitur lain, yang merupakan atribut asal geografisnya dan produksi, pemrosesan, dan penyiapan dilakukan di lingkungan geografis ini.

Indikator “Produk pangan tradisional” ditetapkan untuk pangan jika diproduksi dengan bahan baku tradisional, memiliki komposisi tradisional, diproduksi atau diproses dengan cara tradisional, dan merupakan ciri khusus dari pangan dengan kategori yang sama. Undang-undang ini menetapkan pelanggaran administratif dan hukuman dengan denda mulai dari ratusan ribu hingga satu juta untuk tindakan yang bertentangan dengan persyaratan ketertelusuran, yang ditentukan dalam Pasal 25 undang-undang ini, dan untuk penggunaan catatan “Produk pangan tradisional” yang bertentangan dengan Pasal 33 dari undang-undang ini.

Mempertimbangkan sistem pemalsuan yang dikenal untuk pelabelan, sebagian besar didasarkan pada pembawa data seperti RFID atau kode batang. Teknologi RFID adalah metode untuk mengidentifikasi *item* secara unik menggunakan gelombang radio. Biasanya, pembaca berkomunikasi dengan *tag* yang menyimpan informasi digital dalam *microchip*. Untuk sistem RFID, kita bisa menyebutnya teknik “*Call-in the Numeric Token*” (CNT). Gagasan di balik mekanisme ini adalah untuk menghasilkan nomor identitas acak, unik, dan tidak dapat diprediksi yang merupakan *tag* atau token virtual dan ditetapkan untuk setiap produk. Mekanismenya bergantung pada kesulitan dalam menebak nomor identifikasi yang valid dan membutuhkan partisipasi pelanggan dalam mengautentikasi produk yang mereka beli. Dengan menetapkan ambang batas yang sesuai, *item* apa pun dengan permintaan validasi yang cukup tinggi akan dianggap palsu. Mekanisme lain berdasarkan RFID adalah pe-

nelitian yang dilakukan untuk *tag* yang melakukan autentikasi aman pada jaringan *Electronic Product Code* (EPC). EPC adalah layanan identifikasi unik global untuk objek fisik yang dijelaskan oleh Brock (2001). Organisasi nirlaba seperti EPCglobal mengembangkan standar global untuk meningkatkan visibilitas dan efisiensi di seluruh rantai pasok. *Tag* yang menghormati standar 2 generasinya dapat dengan andal mengautentikasi *item* produk.

Sementara *tag* RFID sulit untuk dipalsukan, *barcode* tidak demikian. Karena strukturnya, *barcode* mudah disalin. Berbagai teknik dikembangkan untuk digabungkan dengan *barcode* sebagai tanda air atau hologram. Xie dkk. (2013) mengusulkan semacam algoritma penggabuan untuk gambar biner untuk memungkinkan metode transformasi *domain-watermarking*. Mereka menunjukkan melalui eksperimen skema *watermarking* yang diusulkan untuk *barcode* QR 2D ternyata sangat meningkatkan kinerja anti-pemalsuan tanpa kehilangan informasi *barcode*. Perusahaan seperti DuPont menerapkan teknologi holografik keamanan 3D. Mereka menggunakan teknologi pencitraan autentikasi terbuka yang canggih untuk perlindungan merek pada kemasan produk.

a. Penggunaan Kode QR Terenkripsi pada Sistem Seluler sebagai Teknologi Anti-pemalsuan

Vukatana (2016) mengusulkan arsitektur untuk produk Albania yang menerapkan keterlacakan berdasarkan *smartphone* dan *barcode* 2D. Arsitekturnya sesuai dengan semua poin yang dibahas dalam pengantar bagian ini termasuk undang-undang, arahan, dan pedoman Albania serta UE. Penelitian difokuskan pada kode QR sebagai bagian dari generasi kedua dari *barcode* yang dikenal sebagai *barcode* 2D. Jenis *barcode* ini dipilih karena dua alasan utama. *Pertama*, tren pengeluaran yang berkembang untuk pengenalan seluler seharusnya hampir dua kali lipat pada tahun 2014 untuk mencapai US\$164 juta dengan kode QR sebagai komponen utama. Tren ini terus tumbuh dengan kuat dan mencapai pengeluaran sebesar US\$364 juta pada tahun 2015. Perkiraan tersebut didasarkan pada laporan peningkatan

tingkat pemindaian. ScanLife, perusahaan terkemuka global yang menyediakan solusi seluler berbasis *cloud* dan teknologi kode QR, menyatakan bahwa mereka memproses 18 juta pemindaian melalui aplikasi ScanBuy di Q1 2013. Angka ini menunjukkan kenaikan dari 13 juta pemindaian di Q1 2012, yang dengan sendirinya naik 157% selama Q1 2011, seperti yang ditunjukkan dalam laporan Marketing Charts (2013). *Kedua*, kode QR paling banyak digunakan melalui *barcode* 2D yang terintegrasi dalam aplikasi kamera ponsel pintar. Baik penggunaan kode berbasis database (VSCode dan Data Matrix) maupun kode berbasis indeks (Visual Code, ShotCode, dan ColorCode).

Barcode adalah pembawa data yang terkait dengan proses pelabelan suatu produk dan digunakan dalam keseluruhan proses dari produsen ke konsumen untuk berbagai tugas, seperti penyimpanan, ID produsen, kwitansi penjualan, dan lain-lain. Penggunaan *barcode* yang besar dalam produk pangan telah mendorong kita untuk memilih kode QR karena implementasi sistem melalui pelabelan akan menjadi pilihan terbaik. Hal ini akan mengurangi biaya penandaan dan menjaga penyimpanan data seminimal mungkin karena teknologi kode batang telah diterapkan oleh operator pelabelan. Selama kita menggunakan *barcode* untuk keterlacakan proses dan transparansi produk ke konsumen, sistem tetap kokoh. Masalah muncul ketika label itu palsu dan entitas kontrol (*National Food Authority*) tidak dapat membedakan produk asli dari yang palsu.

Ada berbagai teknologi anti-pemalsuan. *Pertama*, adalah proses *track and trace*. Proses ini terdiri dari menetapkan identitas unik untuk setiap unit stok selama pembuatan yang kemudian tetap bersamanya melalui rantai pasok sampai konsumsinya. Informasi ditambahkan melalui langkah demi langkah dan berinteraksi dengan *database* aman yang diakses melalui pengidentifikasi unik yang diberikan pada fase awal. *Kedua*, proses silsilah. Proses silsilah adalah dokumen kertas atau *file* elektronik yang mencatat rincian distribusi produk tertentu dari pembuatannya melalui transaksi grosir sampai diterima oleh operator akhir, yang biasanya pengecer.

2. Pemalsuan Pangan di Indonesia

Tantangan baru terkait penanganan penipuan pangan terkait dengan pesatnya pertumbuhan *e-commerce* pangan di kawasan Asia-Pasifik. Negara-negara seperti Australia, Tiongkok, Indonesia, Jepang, dan Korea Selatan mengalami *booming e-commerce* secara umum dan semakin meningkat dalam *e-commerce* pangan. Tiga dari sepuluh pasar grosir *online* teratas di dunia berada di Asia, dengan mayoritas berada di Tiongkok diikuti oleh Jepang dan Korea Selatan (FAO, 2021).

Ada beberapa masalah yang terkait dengan *e-commerce* pangan, terutama antara bisnis dan konsumen, yang membuat *e-commerce* lebih rentan terhadap penipuan pangan. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa konsumen tidak memiliki kontak tatap muka dengan pedagang, tidak ada kesempatan nyata untuk memeriksa pangan sebelum membeli, dan (biasanya) diharuskan membayar sebelum pengiriman. Pada dasarnya, konsumen harus memenuhi kewajiban kontraktual mereka di awal transaksi, sambil memercayai pedagang yang mungkin berada di yurisdiksi lain, untuk memenuhi kewajiban mereka di akhir (Hunter & Riefa, 2018). Selain itu, bahkan pelaku bisnis pangan resmi yang beroperasi secara *online* mungkin tidak dapat mengontrol pengiriman akhir produk, yang sering dikirim ke konsumen akhir atau dikirim melalui kurir. Karena kerentanan ini, penyelidikan baru-baru ini menggunakan kode batang DNA dari produk perikanan yang dijual *online* di Tiongkok menemukan bahwa 85 persen sampel yang diidentifikasi oleh kode batang DNA diberi label yang salah (Xiong dkk., 2016).

Berfokus pada Indonesia, pemalsuan pangan menimbulkan dampak negatif bagi masyarakat Indonesia. Dampak mematikan dari pangan yang tidak aman menimbulkan masalah kesehatan masyarakat, terutama keracunan yang berpotensi menyebabkan kematian. Selain itu, rendahnya kualitas pangan lokal memengaruhi daya saing pangan lokal dalam perdagangan internasional yang dapat menimbulkan permasalahan ekonomi di Indonesia. Negara telah memperhatikan masalah ini dengan menetapkan berbagai undang-undang dan pera-

turan tentang keamanan pangan, termasuk pemalsuan pangan. UU No. 18 tahun 2012 tentang Pangan mengatur persyaratan untuk menghasilkan pangan yang aman, bergizi, bermutu, dan terjangkau. Pada tahun 2004, pemerintah juga mengeluarkan Peraturan Pemerintah 28 Tahun 2004 tentang Keamanan, Mutu, dan Gizi Pangan. Selain itu, Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM) telah dibentuk untuk menjamin keamanan pangan di Indonesia. Badan POM bertanggung jawab untuk mengawasi dan mengendalikan rantai pangan mulai dari produksi, distribusi, hingga konsumsi.

Keamanan pangan adalah isu global. Namun, masalah keamanan pangan yang dihadapi negara maju dan berkembang berbeda. Negara maju menghadapi masalah penerapan teknologi baru dalam produksi pangan, sedangkan di negara berkembang menghadapi masalah keamanan pangan yang meliputi kontaminasi mikrob dan zat kimia yang memengaruhi kualitas produk makanan (Jia & Jukes, 2013). Negara berkembang menghadapi beban masalah keamanan pangan yang lebih berat dibandingkan negara maju.

Pada dasarnya, pangan berasal dari sumber hayati dan air sehingga mudah rusak karena faktor internal dan eksternal. Oleh karena itu, pengolahan dan pengawetan pangan dilakukan agar pangan dapat bertahan lebih lama. Pengolahan dan pengawetan pangan melibatkan penggunaan bahan tambahan pangan untuk mengubah penampilan dan membuatnya bertahan lebih lama.

Pemalsuan pangan umumnya dilakukan dengan motif ekonomi, terutama karena persaingan bisnis. Pelaku memaksimalkan keuntungan mereka dengan meminimalkan biaya produksi. Selain itu, konsumen di Indonesia lebih cenderung memilih pangan yang murah. Sayangnya, murah umumnya berarti berkualitas rendah. Kecurangan ekonomi dapat mengakibatkan masalah keamanan atau nilai gizi produk pangan.

Di Indonesia, banyak terjadi kasus pemalsuan pangan. Misalnya, Satuan Tugas (Satgas) Stabilisasi Pangan Kepolisian Resort Bulungan berhasil mengungkap satu kasus perdagangan produk makanan lintas negara antara Indonesia dan Malaysia. Produk yang diamankan ialah

makanan mentah berupa daging merk Alana (Sutriyanto, 2017). Kasus pemalsuan pangan lainnya adalah pemalsuan sambal yang diawetkan dengan pengawetan kimia melebihi batas (Benzoat) di Tangerang (Wardhani, 2017). Masih banyak kasus pemalsuan pangan lainnya yang berpotensi merugikan masyarakat. Pangan oplosan tidak hanya diproduksi di dalam negeri, tetapi juga dilaporkan banyak pangan ilegal dan tidak aman yang berasal dari negara lain.

Pemalsuan pangan menyebabkan efek berbahaya terhadap kesehatan masyarakat. Menurut Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM), di Indonesia ada sekitar 20 juta kasus keracunan makanan setiap tahun. Wabah keracunan ini mengakibatkan kerugian ekonomi yang pada tahun 2013 menyebabkan kerugian ekonomi sekitar US\$78 juta (Rahayu dkk., 2016). Rendahnya kualitas pangan lokal Indonesia menyebabkan penolakan pasar internasional. Sebagai contoh, Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) menyatakan bahwa per Desember 2020, pada tahun 2020 terdapat 97 kasus penolakan ekspor perikanan dari Indonesia (Kementerian Kelautan dan Perikanan, 2021).

a. Tantangan Penegakan Hukum dan Regulasi Keamanan Pangan

Pemalsuan pangan dan efek berbahayanya di Indonesia membuktikan bahwa penegakan hukum dan peraturan keamanan pangan berjalan tidak efektif. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor berikut yang menghambat terjaminnya keamanan pangan di Indonesia.

1) Regulasi

Sejalan dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang pangan, industri pangan juga semakin berkembang dan mengakibatkan bertambahnya jumlah dan jenis produk pangan yang dihasilkan baik dalam negeri maupun impor. Hal ini menyebabkan banyaknya jenis produk pangan yang dihasilkan, sedangkan definisi dan karakteristik dasar belum diatur dalam aturan kategori pangan.

Isu lain terkait regulasi tersebut adalah lemahnya kewenangan BPOM. BPOM tidak memiliki kekuatan untuk menegakkan hukum. Selama ini, BPOM sangat bergantung pada polisi karena kekuatan penegakan hukum ada di kepolisian. Peran BPOM tidak hanya menjadi pendamping saat razia industri pangan. Untuk itu, perlu dilakukan reformasi hukum untuk memberikan kewenangan kepada BPOM untuk memaksimalkan kinerjanya (Putri, 2018).

2) Daya Beli

Pertumbuhan ekonomi menunjukkan pertumbuhan produksi barang dan jasa dalam suatu wilayah ekonomi dan dalam selang waktu tertentu. Kementerian Keuangan (Kemenkeu) melansir data dari Bank Dunia yang menyatakan bahwa pendapatan per kapita Indonesia turun dari US\$4.050 di tahun 2019 menjadi US\$3.870 di tahun 2020 (Kementerian Keuangan Republik Indonesia, 2021). Hal inilah yang menyebabkan lemahnya daya beli masyarakat terhadap produk yang berkualitas, termasuk untuk produk pangan. Bagi masyarakat miskin, kualitas pangan bukanlah hal utama yang mereka cari dalam mengonsumsi pangan karena mereka lebih mengutamakan rasa kenyang dan harga pangan yang murah.

3) Kesadaran Publik

Bagi masyarakat kelas menengah ke bawah, kualitas bukanlah hal yang penting. Kekenyangannya pangan murah lebih memuaskan mereka. Oleh karena itu, sulit untuk mengidentifikasi penyebab keracunan pangan yang terjadi di masyarakat. Salah satu masalah dalam pencegahan dan pendorong keracunan makanan adalah penyebab keracunan makanan yang tidak diketahui. Hal ini dikarenakan data epidemiologi yang diperoleh dari lapangan tidak lengkap, sampel tidak representatif, hasil uji sampel negatif, atau hipotesis yang salah. Orang pada umumnya sulit untuk mengidentifikasi atau mengingat pangan apa yang mereka konsumsi yang berpotensi menyebabkan keracunan. Bahwa kelengkapan data epidemiologi setiap korban terutama waktu terpapar, gejala menonjol, gejala penyerta, gejala spesifik, masa inkubasi, dan

pangan yang dikonsumsi diperlukan untuk menentukan hipotesis keracunan pangan.

4) Rendahnya Kesadaran dan Pengetahuan Produsen

Produsen pangan di Indonesia cenderung menonjolkan keuntungan tanpa mempertimbangkan bahaya bagi konsumen. Minimnya pengetahuan produsen pangan juga bisa menjadi penyebab terjadinya kasus pemalsuan pangan. Jumlah industri rumah tangga di Indonesia cukup tinggi. Bahkan, pemerintah juga mendorong masyarakat untuk membangun usaha mandiri untuk membantu perekonomian rumah tangga yang dibuktikan dengan izin perizinan yang tidak ketat. Rumah tangga yang tidak berizin sulit dipantau oleh BPOM karena menyebabkan produk pangan tidak memenuhi standar.

Dalam studi kasus Indonesia, kita dapat menyimpulkan bahwa meski sudah ada regulasi yang mengatur masalah keamanan pangan khususnya pemalsuan pangan, kejahatan terhadap ketahanan pangan masih bisa ditemukan dengan mudah di Indonesia. Hal ini dibuktikan dengan tingginya angka keracunan dan penyakit akibat pangan yang terkontaminasi. Tingkat keracunan yang tinggi juga menyebabkan kerugian ekonomi. Melalui subbab ini diketahui bahwa kendala yang dihadapi dalam penegakan hukum keamanan pangan di Indonesia disebabkan karena faktor regulasi itu sendiri, daya beli masyarakat, kesadaran masyarakat, dan kurangnya pengetahuan serta kesadaran produsen pangan. Jika keamanan pangan terjamin, kualitas masyarakat di Indonesia akan meningkat. Selain itu, jika keamanan pangan di Indonesia tetap terjaga, produk pangan di Indonesia dapat bersaing di pasar internasional.

Sampai dengan Bab IX ini kita telah mengetahui berbagai teknologi 4.0 yang tersemat pada produk pangan dan berbagai manfaat yang mereka berikan. Bab selanjutnya akan mulai membahas teknologi yang berperan dalam produksi dan distribusi pangan dari produsen sampai ke tangan konsumen. Dimulai dari Bab X, kita akan membahas penggunaan *drone* dalam aspek produksi dan distribusi pangan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB 10

Penerapan Teknologi *Drone* Pertanian

A. Potensi dan Tantangan

Pandemi Covid-19 telah membuat sulit kehidupan masyarakat sehari-hari dan mendorong masyarakat untuk tidak melakukan banyak rutinitas dan membatasi aktivitas mereka seminimal mungkin, kondisi ini juga menyebabkan masalah pasokan pangan. Sebaliknya, sebagian besar orang telah mengamankan persediaan pribadi bahan pangan penting yang dikenal sebagai *panic buying*, mengingat tekanan psikologis dari situasi tersebut. Efeknya dapat dilihat dalam hal kekurangan pasokan pangan, permintaan produk pangan terutama selama *lockdown*, inflasi harga pangan, migrasi tenaga kerja pedesaan, dan lain-lain.

Rantai pasok pangan adalah jaringan dinamis termasuk petani, pelanggan, pasokan dari pertanian dan perikanan, manufaktur dan penyimpanan, transportasi dan distribusi, dan sebagainya. Fluktuasinya tidak begitu signifikan karena produksi pangan cukup dan harga stabil hingga saat ini. Pasokan sereal global berada pada tingkat yang

dapat dikelola, dan tahun 2020 menguntungkan untuk gandum dan tanaman pokok utama lainnya. Sementara itu, produksi pangan yang lebih sedikit dari barang-barang bernilai tinggi (seperti buah dan sayuran) sudah mungkin terjadi, komoditas ini belum terlihat karena *lockdown* dan gangguan dalam rantai nilai. Di sisi lain, penggunaan *smartphone* berkembang sebagai sistem komunikasi internet tertentu yang digunakan. Dengan situasi global pandemi Covid-19, pergeseran ke inovasi modern tampaknya memungkinkan transisi di berbagai sektor pertanian. Pada tahun 2050 populasi dunia diperkirakan mencapai 10 miliar ini menimbulkan masalah besar bagi industri pertanian. Meskipun menghadapi tantangan seperti gelombang panas, pemanasan global yang meningkat pesat, dan konsekuensi lingkungan dari pertanian, permintaan akan lebih banyak pangan harus tetap dipenuhi. Pertanian harus beralih ke teknologi baru untuk memastikan persyaratan yang berkembang ini terpenuhi.

Implementasi pertanian pintar berbasis *drone* dan IoT akan memungkinkan produsen pertanian untuk memahami limbah dan meningkatkan produktivitas mulai dari meningkatkan penggunaan pupuk hingga meningkatkan efisiensi jalur kendaraan pertanian. Pertanian cerdas adalah sistem padat modal, sistem teknologi tinggi dari pangan yang tumbuh secara bersih dan berkelanjutan untuk masyarakat. Hal ini adalah hasil dari Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK) baru di bidang pertanian. Kewirausahaan telah menerima kemajuan luar biasa di bidang pertanian dan pertumbuhan berkelanjutan untuk irigasi otomatis dan pemantauan serta pemecahan banyak masalah utama yang terkait dengan menghubungkan dan membersihkan limbah yang menjadi simbol keuletan dan pencapaian bisnis. Covid-19 telah menggarisbawahi bahwa kita perlu mulai melakukan permintaan pasar untuk sistem pangan yang lebih sehat dan berkelanjutan. Ada banyak potensi di Indonesia, yaitu desa dan keterlibatan pertanian cerdas memainkan peran penting bagi pembangunan negara. Di negara kita, pertanian bergantung pada musim hujan yang sumber airnya tidak mencukupi karena irigasi digunakan di bidang pertanian. Dalam sistem irigasi itu diidentifikasi jenis tanah

dan retensi air yang disediakan menjadi informasi penting tentang kesuburan tanah dan untuk menyerap dan menanamkan kadar air dalam tanah.

Saat ini, ada berbagai teknik irigasi yang tersedia untuk mengurangi ketergantungan pada cuaca. Sebagian besar sistem tersebut ditenagai oleh daya listrik dan siklus hidup. Selama prosedur ini, indikator ketinggian air yang dipasang di reservoir air dan sensor kelembapan tanah terletak di zona akar tanaman dan dekat dengan modul dan perangkat gerbang mengelola informasi sensor kemudian mengirimkan data ke prosesor. Revolusi pengusaha muda harus didukung oleh praktik pertanian baru dan inovatif yang penting untuk perbaikan pasar pertanian saat ini. Penekanan yang signifikan harus diberikan pada item bernilai tambah. Fasilitas penyimpanan yang tepat akan meminimalkan kehilangan hasil panen dan disarankan agar fasilitas penyimpanan dibangun di tempat yang dekat dengan lokasi pertanian/produksi. Hal ini dapat dicapai sebagai inisiatif bersama antara kolektif petani dan badan-badan pemerintah pusat. Ini akan memberi para petani potensi untuk memantau nilai barang-barang mereka dan menghasilkan lebih banyak keuntungan.

Dengan munculnya IoT, robotika, ilmu data, dan AI, teknologi ini akan berpotensi menjadi alat yang berguna bagi petani kecil untuk memperkaya mata pencaharian mereka dan memberikan beragam peluang bagi pedesaan. Teknologi informasi dan komunikasi dapat menghubungkan petani dengan informasi, jaringan, dan institusi untuk meningkatkan peluang produktivitas dan pekerjaan. Misalnya, dapat memberikan akses informasi tentang fasilitas penyuluhan, pasokan pupuk, prediksi cuaca, dan pasar. *Drone* adalah pesawat tanpa awak/*unmanned aerial vehicles (UAV)* yang membawa sejumlah perangkat yang berguna seperti kamera, GPS, perangkat lunak dan perangkat keras khusus untuk diproses, dan material yang dapat disemprotkan. *Drone* telah berhasil digunakan dalam berbagai aplikasi seperti penegakan hukum, perikanan, pengawasan, pengelolaan air, berbagai aplikasi militer dan lain-lain. Beberapa pendekatan yang paling penting adalah keprihatinan bahwa total lahan pertanian

yang tersedia untuk produksi pangan telah mengalami penurunan tajam. Kondisi lainnya adalah kesulitan untuk memantau tanaman di musim tanam yang berbeda karena perubahan pola kebutuhan air dan pertumbuhan vegetasi di area penggarapan lahan. Di negara kita, sumber daya pedesaan lebih didorong untuk menguntungkan orang miskin akan bergantung pada pengembangan model sumber daya publik yang beragam, ketahanan tanaman, dan modal sosial. Selanjutnya, efek gabungan dari perubahan iklim dan populasi yang tumbuh cepat di pedesaan membuat kita perlu menemukan cara untuk menghasilkan habitat pangan yang lebih berkelanjutan tanpa menyebabkan kerusakan lingkungan.

UAV dapat dianggap sebagai teknologi cerdas dengan berbagai kasus penggunaan yang berhasil. Keuntungan utama dari teknologi ini adalah kemampuannya untuk beroperasi di ketinggian, memberikan kendaraan kemampuan untuk kontrol secara keseluruhan dalam tiga dimensi. Rantai pasok pangan telah mengalami peningkatan yang cukup besar dalam efisiensinya setelah menggunakan teknologi yang sedang berkembang ini dalam aplikasi. UAV saat ini diterapkan dalam beragam aplikasi sipil dan militer, termasuk pencarian dan penyelamatan, pemantauan panen, keamanan, organisasi gudang, dan pengiriman barang. Manfaat sederhana dari UAV dapat diperluas ke aplikasi yang lebih kompleks dengan memasang kamera ke *drone* untuk berbagai tujuan, menambahkan GPS untuk pencarian lokasi dan pengiriman, atau menghubungkan sensor untuk pemantauan peternakan dan pelacakan satwa liar.

Sebaliknya, mengingat pengalaman petani setelah bertahun-tahun bekerja di lahan, teknologi dapat menyediakan alat sistemik untuk mendeteksi masalah tak terduga yang sulit diperhatikan dengan inspeksi visual pada pengamatan biasa. Kita akan memerlukan data agronomi pendukung—seperti tanah, air, dan cuaca—untuk kalibrasi model tanaman guna membuat keputusan yang tepat. Saat ini, helikopter dan pesawat ringan digunakan untuk mengumpulkan foto udara di sekitar lahan. Melalui penggunaan teknologi yang digunakan dalam pertanian presisi menggunakan *drone*, satelit, jaringan sensor

nirkabel, IoT, dan sebagainya, kita bisa mendapat peningkatan hasil panen atau produksi sekaligus mengurangi biaya produksi tanaman. Dalam perhitungan presisi benih, mungkin ada beberapa variabel untuk diuji. Transformasi generasi dalam konteks pembangunan pedesaan melampaui pengurangan rata-rata umur petani. Ini juga tentang memberdayakan generasi baru petani muda yang berkualifikasi tinggi untuk memanfaatkan sepenuhnya teknologi guna mendukung praktik pertanian berkelanjutan. Sistem ini akan mengumpulkan banyak sekali kumpulan data yang dapat diberi catatan dan akan menggunakan analisis *big data* di atas lingkungan komputasi awan dan sistem perangkat lunak yang ekstensif sehingga petani kecil dan menengah dapat memperoleh manfaat dari pengelolaan pertanian dan tanaman terpadu. Metodologi desain dan implementasi ini merupakan bagian dari *internet of things* yang lebih besar di mana semua pemantauan terkait pertanian sekarang dapat dibawa dari lahan ke petani di rumah.

Drone yang dilengkapi dengan sistem kamera canggih sebenarnya tersedia untuk menangkap citra fotografi mulai dari pencitraan standar hingga ultraviolet dan hiperspektral. Beberapa dari kamera tersebut juga dapat merekam *footage* (cuplikan). Selain itu, kualitas gambar yang digunakan oleh *drone* terus meningkat dan memungkinkan petani mendapatkan data lapangan yang andal. *Drone* juga berguna untuk kepentingan keamanan pertanian dan entomologi. Teknologi ini memperlakukan *drone* sebagai entitas independen dan terkoordinasi sehingga mereka dapat beroperasi secara kooperatif. Selanjutnya, Model Ketinggian Digital 3D (DEM)/3D *Digital Elevation Model* (DEM) yang komprehensif akan dipelajari untuk lapangan secara luas, yaitu dalam kasus petani kecil ini menyiratkan bahwa pertanian di sekitar mereka juga akan dimodelkan sehingga mereka bisa mendapatkan pandangan luas tentang kebutuhan pertanian mereka dan memahami keterbatasan di mana mereka dapat beroperasi. *Big data* melalui lingkungan komputasi awan akan digunakan untuk melakukan analisis yang diperlukan untuk menyediakan sistem pendukung keputusan yang komprehensif.



Sumber: TTA Aviation (2018)

Gambar 10.1 Contoh *Drone* untuk Produksi Pertanian

Selain kemampuan untuk merekam, TTI Aviation, yang berbasis di Tiongkok, saat ini mengembangkan TTI Agriculture Drone untuk keperluan pemupukan dan penaburan benih.

Drone ini tidak hanya mampu melakukan penyemprotan, tetapi juga dapat melakukan pekerjaan penyebaran benih dan penaburan pupuk hanya dengan mengganti perangkat lampiran.

B. Produksi Cerdas dengan Penggunaan *Drones* dan IoT

1. IoT

Fenomena kolaborasi teknologi *drone* dan IoT yang terlihat dalam perang melawan Covid-19 dan menunjukkan bahwa setidaknya kita selalu memiliki teknologi untuk melanjutkan perang melawan pandemi. Jika kita melihat fenomena yang dipraktikkan di garis depan dalam tahap pengujian dua teknologi ini, pembuktian konsep, atau fase produksi, yang menunjukkan bahwa ide sudah tersedia. Penyedia teknologi dapat memahami, setelah beberapa kebingungan di awal, bagaimana menggunakan teknologi IoT sebagai solusi. Perusahaan dapat menggunakan IoT bersama dengan teknologi lain untuk menangani penyakit menular, tetapi mereka terbagi dan akan membutuhkan lebih banyak infrastruktur untuk menghubungkan pengumpulan

data, pemrosesan, analisis, dan komponen penyimpanan. Rencana respons wabah yang komprehensif mencakup semua program dengan cara yang sama, termasuk rumah sakit, pengawasan, pemantauan penyakit, dan lainnya. Terlepas dari faktor-faktor negatif, seperti ketersediaan lahan yang rendah, ketersediaan air per kapita yang rendah, kemiringan lahan, dan perubahan iklim dalam beberapa tahun terakhir, masyarakat kita telah menunjukkan pendekatan positif terhadap pertanian pangan dan sektor pertanian secara umum. Peningkatan jumlah masuknya generasi muda terdidik ke dalam *agripreneurship* juga sedang diupayakan oleh pemerintah.

IoT mengubah fungsi dan penggunaan web. Web 1.0 menunjukkan komunikasi satu arah, yaitu mengirimkan beberapa informasi kepada konsumen untuk membuatnya 'dapat dibaca' melalui browser. Web 2.0 berarti bahwa Web 1.0 diperbarui menjadi komunikasi dua arah dengan bantuan teknologi modern (blog, situs jejaring sosial, berbagi video). Pembuat konten untuk Web 1.0 dan Web 2.0 adalah orang, sedangkan pengenalan IoT membawa data generasi modern. Pergeseran kualitatif dalam fungsi pembuatan data, dan khususnya peningkatan kuantitatif dalam jumlah data, menawarkan dasar untuk pengembangan paradigma saat ini menggunakan *World Wide Web* sebagai referensi.

Berfokus pada gambaran singkat di atas, dapat dikatakan bahwa arsitektur IoT mencakup berbagai komponen keuangan, operasional, jaringan, dan komunikasi informasi yang harus berfungsi secara sinkron untuk memelihara fasilitas dasar, dan hampir tidak masuk akal untuk berasumsi bahwa interpretasi tertentu sesuai untuk semua pihak. Revolusi oleh pengusaha muda harus didukung dengan praktik pertanian baru dan inovatif yang penting untuk kemajuan di bidang ini dan pasar pertanian. Perhatian khusus harus diberikan pada produk bernilai tambah dan hal yang sama harus dipromosikan di kalangan petani serta perusahaan pengolahan pangan. Fasilitas penyimpanan dingin yang tepat dapat mengurangi pemborosan sayuran dan direkomendasikan untuk memasang fasilitas penyimpanan dingin di lokasi dekat lahan produksi. Hal ini dapat dilakukan sebagai usaha

bersama oleh kelompok tani dan pemerintah setempat. Ini akan memberikan kemampuan untuk mengontrol harga produk mereka dan mendapatkan keuntungan yang lebih baik. Jika kita membandingkan pedesaan dan perkotaan, sebagian besar penduduk yang tinggal di pedesaan tidak mampu mengimbangi kesenjangan, untuk mencapai pembangunan ekonomi yang seimbang, demi mengembangkan pedesaan Indonesia menjadi tak terelakkan untuk mempromosikan *agripreneurship*. Untuk memanfaatkan sumber daya pedesaan yang kaya, untuk menemukan potensi di pedesaan, strategi terbaik adalah mempromosikan *agripreneurship*.

Contoh kasus di India, di perusahaan rintisan teknologi pertanian India dengan pendanaan pada paruh pertama tahun 2019 lebih dari tiga kali lipat dibandingkan dengan investasi US\$ 73 juta pada tahun 2012. Menariknya, *start-up* teknologi pertanian mungkin satu-satunya *start-up* yang benar-benar dapat menjadi *Make in Model* India dengan lebih dari 25 perusahaan *Agritech* India mampu hadir secara global. Lebih dari setengah dari perkiraan 450 *start-up* agroteknologi di India menawarkan solusi rantai pasok seperti akses yang lebih baik ke input bagi petani atau hubungan pasar dengan ekosistem yang condong ke model B2B. Forum Ekonomi Dunia dan Bank Pembangunan Asia juga telah berinvestasi di perusahaan rintisan *Agritech* India. Dengan demikian, ekosistem *Agritech* India berkembang dengan cepat di tengah peluang bisnis yang muncul dalam hubungan pasar, digitalisasi di bidang pertanian, sehingga menawarkan akses yang lebih baik ke input, layanan pertanian, dan keuangan. Alasan sektor ini memiliki begitu banyak peluang dapat dikaitkan dengan jumlah mata rantai yang rusak dalam rantai pasok yang telah menyebabkan kerugian pascapanen. Inspirasi untuk mencoba memperkenalkan IoT dapat diklasifikasikan dari aspek objektif, yaitu medium yang mengimplementasikan solusi berupa:

- a) Pengumpulan dan penyimpanan data yang disurvei secara *real-time* menggunakan sistem IoT.
- b) Kontrol yang efisien dari jaringan layanan terdistribusi (menggunakan jaringan terintegrasi yang didukung oleh sensor).

- c) Pemrosesan data dari IoT yang disimpan di pusat data dalam inti informasi perusahaan, *cloud*, atau node itu sendiri yang terhubung dengan sensor.
- d) Pelacakan aktif dan teknik analisisnya secara *real-time* menjadi sangat penting. Dokumen membentuk dasar untuk keputusan manajemen yang efektif dan penilaian bisnis yang baik menjamin produktivitas yang efisien yang mengarah pada pembangunan berkelanjutan organisasi.
- e) Melakukan pemantauan pengoperasian peralatan, pemantauan perkembangan dan status pabrik, serta pergerakan hewan yang relevan dengan produksi dan operasi organisasi, memastikan pengurangan biaya bisnis.

Solusi dan manfaat pada manusia:

- a) Surveilans aktivitas penting pada manusia.
- b) Melacak ketersediaan kendaraan secara *real-time* dalam transportasi perkotaan dan mendukung *carpooling*.
- c) Pengurangan dan kontrol panas dan efisiensi konsumsi daya listrik.
- d) Pemantauan dan keamanan properti pribadi.

Solusi dan manfaat bagi masyarakat:

- a) Kontrol kota pintar (pemantauan dan pengaturan listrik, air, sumber komunikasi, layanan darurat, dll.).
- b) Realisasi dan integrasi mobil nirsupir ke dalam kota pintar.
- c) Pemantauan dan keamanan properti sosial.

2. *Drone* Pertanian

Beberapa fungsi IoT pertanian yang lebih baik akan memungkinkan petani memantau fasilitas penyimpanan secara *real-time* untuk penghematan biaya menggunakan mesin, kamera, dan berbagai macam peralatan yang berbeda dalam layanan pesan dua arah. Hal ini akan memungkinkan pengelolaan sumber daya air di lahan pertanian menggunakan fungsi pompa sesuai kebutuhan. Pertanian IoT

dapat menggunakan sensor untuk mengumpulkan proses produksi pertanian, logistik produk, dan informasi terkait untuk terhubung ke jaringan transmisi.

Integrasi mendalam antara informasi dan industri pertanian akan menghasilkan kekuatan baru dengan mengubah lanskap pertanian. Tidak ada satu rute yang benar “untuk melakukan inkubasi agrobisnis”. Sebaliknya, pekerjaan inkubasi agrobisnis tergantung pada keadaan perkembangan ekosistem agrobisnis dan berubah seiring waktu saat ekosistem matang dan berkembang. Hal tersebut masih termasuk dalam fase awal. Inkubator mendemonstrasikan kelayakan model bisnis baru dan berusaha menciptakan dan menangkap nilai tambah dari produk pertanian. Dalam ekosistem pertanian yang belum berkembang, inkubator membantu memperkuat dan mempromosikan hubungan antara bisnis dan peluang komersial baru. Mereka menciptakan platform baru pada inovasi yang cocok untuk perusahaan agrobisnis dan memungkinkan perusahaan pertanian untuk menemukan bentuk bisnis yang inovatif dan bahkan lebih menguntungkan.

Selama tahap pertumbuhan berikutnya, inkubator berfungsi sebagai fasilitator jaringan, yakni menghubungkan penyedia layanan tertentu dengan agrobisnis dan menghubungkan agrobisnis yang berbeda satu sama lain. Siklus inkubasi untuk agrobisnis berfokus pada mengembangkan agrobisnis tahap awal yang kreatif dengan potensi pertumbuhan yang kuat untuk menjadi perusahaan yang menguntungkan. Inkubator agrobisnis juga memungkinkan *start-up* dan pengembangan agrobisnis bernilai tambah yang kreatif. Selama dua dekade terakhir, beberapa organisasi pembangunan seperti Bank Dunia telah menguji pendekatan alternatif untuk mengubah keunggulan komparatif di pasar komoditas menjadi keunggulan kompetitif di pasar produk yang berbeda.

Inkubator Agrobisnis yang memfasilitasi pembentukan usaha di bidang pertanian harus berpikir dan bekerja secara berbeda dari jenis inkubator lainnya karena fungsi yang dijalankan oleh inkubator agrobisnis lebih kompleks dan berisiko. Akhirnya, dalam tahap

pertumbuhan pasar yang lebih matang, inkubator berfungsi sebagai platform untuk berbagi produk. Proses inkubasi agrobisnis berfokus pada pengembangan agrobisnis inovatif tahap awal dengan potensi pertumbuhan tinggi untuk menjadi perusahaan yang berdaya saing.

Benih nutrisi permukaan meningkatkan biaya penanaman. Penyemprotan tanaman akan memeriksa tanah dan menyemprotkan volume ruang modulasi cairan yang sesuai (Zhang, 2015). Pelacakan tanaman, hiperspektral, irigasi multispektral¹⁹ atau termal dan pemindaian tanaman dapat memberikan evaluasi kesehatan menggunakan gambar. Melalui *drone* juga, aplikasi yang tepat dari pupuk dan pestisida yang diterapkan pada masalah secara khusus dalam wilayah tertentu bisa diterapkan. Sebelum siklus panen dimulai, rekayasa *drone* dapat digunakan untuk menentukan kualitas tanah dan memprediksi hasil di masa depan. Alat utama dalam estimasi kualitas tanah adalah pemetaan 3D dari tanah dengan cakupan warna tanah yang terperinci. CEO perusahaan Freelance Robotics, William Pagnon, menegaskan peran perusahaan dalam mengembangkan berbagai jenis kendaraan otonom untuk keperluan pertanian seperti traktor dan irigasi. Figorilli dkk. (2018) menyatakan bahwa peningkatan penggunaan pesawat tanpa awak di daerah pertanian telah berkontribusi untuk meningkatkan efektivitas operasi penyemprotan. Pesawat tanpa awak juga terbukti efektif dalam memantau dan memeriksa ternak.

Teknologi *drone* dapat diterapkan untuk berbagai aplikasi dalam pengembangan pertanian, mulai dari potensi keberhasilan untuk tujuan perencanaan, evaluasi lahan dan tanaman, hingga penyemprotan tanaman yang tepat. Namun, seperti semua alat lainnya, strategi dan penyiapan yang tepat diperlukan untuk benar-benar memanfaatkan teknologi yang tersedia. Selain dari tingkat mekanisasi, salah satu perbedaan utama antara budi daya konvensional dan kontemporer adalah data yang diperoleh langsung dari tanaman. Di pertanian konvensional, di mana petani menentukan dengan penilaian visual, penilaian bersyarat dan sewenang-wenang. Pembangunan pertanian

¹⁹ Multispektral dari kamera atau pemindai udara adalah perangkat mampu merasakan dan merekam radiasi dari bagian spektrum elektromagnetik yang tidak terlihat maupun yang terlihat.

memberikan evaluasi hasil kuantitatif yang dihasilkan oleh keputusan yang tepat.

Teknologi *drone* akan memberikan industri pertanian berteknologi tinggi strategi dan taktik yang didasarkan pada pengumpulan dan penanganan data *real-time*. Baru-baru ini, kemajuan dalam pengenalan gambar dan pemrosesan sinyal optik telah meningkatkan kemampuan WSN untuk menilai kualitas dan kesehatan tanaman secara andal. *Drone* ini melakukan pengamatan dalam penerbangan. Para petani memasukkan detail lapangan untuk disurvei dan memilih ketinggian. Kita dapat mengambil wawasan dari data *drone* tentang indeks pertumbuhan tanaman, pelacakan tanaman dan prakiraan hasil, pengukuran persentase perkecambahan, pelacakan tutupan kanopi, pemetaan kolam air lahan, pengukuran inventaris, pengukuran klorofil gandum, pemetaan drainase, pemetaan tekanan gulma, dan sebagainya.

Sepanjang penerbangan, *drone* menangkap citra multispektral, kinetik, grafis, kemudian mendarat di tempat yang sama saat ia lepas landas. Kekeringan menjadi perhatian besar yang mengurangi efisiensi hasil panen. Banyak daerah di seluruh dunia menghadapi masalah ini dengan tingkat dampak yang berbeda terhadap populasi yang lemah dan rentan. Untuk mengatasi masalah ini, khususnya di daerah pedesaan dan terpinggirkan, pengindraan jauh digunakan untuk mendapatkan data kelembapan tanah yang sering membantu untuk memahami kekeringan di daerah terpencil. Inkubator Agrobisnis yang meningkatkan penciptaan usaha di industri pertanian akan melihat dan bekerja secara berbeda dari jenis inkubator lainnya, karena fungsi yang dilakukan oleh inkubator agrobisnis lebih spesifik dan ancaman yang mereka tangani jauh lebih parah daripada yang dialami oleh industri lain. Tujuan inkubasi bisnis terletak pada industri pertanian. Selain itu, poin *leverage* keduanya lebih besar dalam jumlah dan lebih dinamis dalam penerapannya, dan toleransi risiko investor dalam bisnis biasanya lebih kuat daripada di industri lain.

C. IoT Bertindak sebagai Tulang Punggung dalam Mengatasi Masalah Covid-19 di Pertanian

IoT sudah digunakan untuk manajemen dan aspek lain dari Covid-19, dan ini membantu kita memerangi pandemi. Di sini, kita akan membahas *drone* sebagai kasus penggunaan IoT dalam pandemi Covid-19 di bidang pertanian. Pertanian modern membutuhkan pemantauan terus menerus terhadap benih, hewan, dan mesin untuk mencapai efisiensi yang optimal. Era robotisasi pertanian saat ini, penting untuk membuat program pengumpulan data otomatis yang efektif, khususnya untuk status tumbuhan dan hewan, yang akan mengirimkan data yang diperlukan dalam jangka waktu yang terbatas. Biasanya ada dua alternatif untuk tujuan ini: jaringan komputer IoT (*Internet of Things*), dan *drone* (terutama untuk pabrik) dengan peralatan khusus, sebagian besar audio, visual, memastikan pengurangan biaya. Solusi IoT menjadi tulang punggung teknologi yang dapat mendukung semua sistem ini.

1. IoT vs *Drone*: Implementasi dalam Pertanian

Tujuan khusus dari subbab ini adalah untuk mendeteksi elemen yang mengandung tingkat kebaruan yang signifikan, antara lain sebagai berikut:

- a. Merancang *drone* skala kecil multi-perangkat menggunakan perangkat lunak *Commercial Off-The Shelf* (COTS) selain menggunakan *drone* COTS komersial (sehingga seseorang dapat melakukan perbandingan dari berbagai aspek).
- b. Mengembangkan rangkaian perangkat lunak pemrosesan gambar inframerah-dekat untuk pemodelan pertumbuhan tanaman dan membuat *database* khusus tanaman.
- c. Mengembangkan rangkaian perangkat lunak pemrosesan gambar inframerah-dekat untuk profil penyakit (termasuk analisis siklus hidup mereka) dan membuat *database* khusus tanaman.

- d. Mengembangkan rangkaian perangkat lunak pemrosesan gambar inframerah-dekat untuk pemodelan entomologi musiman dan membuat *database* khusus tanaman.
- e. Mengidentifikasi vektor 3D penyebaran penyakit dan serangga.
- f. Melakukan proses manajemen dan pemantauan pascabencana.
- g. Mengembangkan model *3-Dimensional Digital Elevation* (DEM) tanah untuk memahami penggunaan air dan nutrisi.
- h. Mengembangkan model *cost-benefit* untuk penerapan pertanian presisi berbasis satelit.

Drone pertanian modern menggunakan teknologi *flying-by-wire* yang sepenuhnya otonom dan diprogram untuk mengikuti lintasan tertentu. Ini dilengkapi dengan perangkat seperti akselerometer, giroskop, kompas, dan peralatan untuk mengatasi rintangan. Auto-pilot mengontrol rute, menghitung semuanya dari lepas landas dan perjalanan sampai ke pendaratan, mencari cakupan lahan, sehingga mengumpulkan semua data yang diperlukan. “Pengguna tidak perlu secara manual membuat atau memetakan jalur misi atau menyusun rencana penerbangan berdasarkan kondisi cuaca. Perangkat ini memenuhi kebutuhan empat area fungsional utama (Hameed, 2018), yaitu, fotogrametri, perlindungan, komunikasi & koordinasi, dan navigasi. Perangkat dipasang pada satu platform stabil di bawah *drone*. Salah satu *drone* akan membawa kamera hiperspektral, seperti yang telah ditunjukkan dalam literatur bahwa gambar hiperspektral dapat memberikan pemahaman yang lebih baik tentang tanaman dan profil penyakit; namun, pekerjaan komprehensif di area ini masih belum dalam domain publik. Semua *drone* akan membawa kamera visual resolusi tinggi, kamera inframerah-dekat dan kamera penginderaan kedalaman/*Depth-Sensing Camera* (DSC) yang bekerja dalam cahaya terang dan gelap. Telah terbukti bahwa DSC dapat bekerja baik melalui kondisi berasap dan berkabut. Perlindungan debu dan pasir juga akan tersedia di semua *drone*, selain unit GPS dan *gyroscopic*. Kita bisa menyebarkan *drone* berbasis COTS, tetapi jika harganya sangat mahal, variasi lokal pun bisa dicoba.

a. Mekanisme Jaringan dan Komunikasi

Drone bisa menggunakan protokol komunikasi ZigBee Pro/IEEE 802.15.4, yang karakteristik tipikalnya diberikan pada Tabel 10.1 Standar ZigBee mendukung tiga jenis perangkat: perangkat ZigBee Coordinator, ZigBee Router dan ZigBee End, dengan setiap jenis perangkat menerapkan beberapa jenis fungsi, sehingga memengaruhi biaya perangkat secara keseluruhan. Sebagaimana dicatat, komunikasi ZigBee mendukung topologi *point-to-point*, *point-to-multipoint*, dan *peer-to-peer*. Selain itu, fitur *self-routing*, *self-healing*, dan *fault-tolerant* juga tersedia di jaringan ini. Banyak negara di Asia Tenggara termasuk India adalah ekonomi agraris dan bergantung pada reservoir air berawa untuk pertanian. Sangat mudah untuk menemukan badan air kecil di seluruh anak benua India yang dipenuhi dengan *duckweed* hijau dan molases yang mudah untuk menanam teratai dan makanan berbasis air lainnya yang dapat bermanfaat.

Tabel 10.1 Jenis Perangkat dalam *Drone*

Perangkat fotogrametri:

- a) Kamera visual resolusi tinggi
- b) Kamera inframerah-dekat
- c) Kamera hiperspektral
- d) *Depth-Sensing Camera* Bekerja dalam Cahaya Terang

Perangkat perlindungan:

- a) Unit perlindungan debu dan pasir

Perangkat komunikasi dan koordinasi:

- a) Perangkat komunikasi berbasis agen

Perangkat navigasi:

- a) GPS
 - b) Girooskop
-

Sumber: Dutta & Mitra (2021)

Robot yang mampu melakukan operasi seperti pembersihan *duckweed* secara otomatis, irigasi, penggunaan pupuk menggunakan

drone bisa dikembangkan. Akan ada dua desain robot yang akan mengapung di permukaan air untuk membersihkan *duckweed*, mengidentifikasi tingkat pH air, dan data terkait lainnya. Teknologi lain yang bisa digunakan adalah *drone* udara yang pada gilirannya akan bergerak ke arah *duckweed* yang lebat dan menyemprotkan pupuk. Robot-robot tersebut berukuran kecil, ringan, mengambang, hemat energi, kompatibel dengan lingkungan, mampu bernavigasi secara mandiri dan berkoordinasi satu sama lain dalam berbagai skenario, seperti perairan pesisir, danau buatan dan alami, laguna, serta sungai. Sebagai bagian dari desain akan memantau kepadatan *duckweed* menggunakan sensor dan membuat data tersedia untuk *drone*.

Format Komunikasi Paket didokumentasikan dengan baik dan sistem perangkat lunak yang relevan juga tersedia. Keseluruhan arsitektur proposal, sebagai sistem IoE pertanian berbasis *drone*, di mana petani dapat mengetahui tentang sifat tanah, pertumbuhan tanaman, dan mengontrol nutrisi dan banyak parameter lainnya. Selanjutnya, pengaturan ini akan ditingkatkan melalui kamera yang ditempatkan di tempat-tempat strategis. Perlu dicatat bahwa petani dapat berkomunikasi dengan setiap node melalui ponsel pintar. Selain itu, APPS yang sesuai akan dikembangkan sehingga keterlibatan *online* dengan pertanian mereka dapat dilakukan dari mana saja dan kapan saja.

b. Mengelola Keamanan Data Pertanian Individu Petani

Keamanan data merupakan isu utama di dunia digital termasuk di dunia digital pertanian. Penggunaan *drone* menggunakan kebijakan *e-agriculture* akan mengarah pada peluang dan regulasi serta praktik yang lebih baik di pasar komersial dan perencanaan penggunaan lahan. Perlu dicatat bahwa informasi statistik yang dikumpulkan dari petani kolektif akan berguna bagi semua petani dan karenanya hasil kumulatif atau gabungan akan tersedia secara statistik.

Banyak negara di Asia, termasuk India, adalah ekonomi agraris dan sebagian besar penduduk pedesaan mereka bergantung pada pertanian untuk mencari nafkah. Bertujuan untuk meningkatkan produktivitas dan mengurangi tenaga kerja yang terlibat, Dutta dan

Mitra (2021) telah merancang robot pembersih air permukaan dan penyemprot pupuk serta agribot berbasis IoT yang dapat menyemprot di atas *duckweed* dalam dan membersihkannya untuk digunakan lebih lanjut. Robot ini dirancang untuk menjalankan fungsi dasar yang diperlukan untuk dilakukan di lahan pertanian. Tujuannya adalah untuk menyediakan mekanisme penyemprotan yang terkontrol dengan kondisi atmosfer dalam sistem pembersihan air permukaan dan desain pemantauan.

Penggunaan IoT di bidang pertanian juga berpotensi mengubah lingkungan menjadi lebih baik dan membuat produksi lebih efisien. Namun, penggunaan teknologi seperti IoT di bidang pertanian memiliki dampak yang signifikan. Jadi, untuk memenuhi selera penduduk, sektor pertanian harus mengambil kekuatan IoT. Dalam setiap skenario, kebutuhan pangan yang lebih banyak harus dipenuhi untuk menghadapi semua tantangan. Orang tidak boleh mati karena kelaparan! Pertanian berkelanjutan bergantung pada inovasi IoT yang memberdayakan petani, pengurangan limbah, dan meningkatkan efisiensi yang bervariasi mulai dari jumlah pupuk yang digunakan hingga jumlah perjalanan yang dilakukan oleh petani. Dalam pertanian pintar berbasis IoT, alat penyaringan bidang pertanian dirender menggunakan sensor untuk mengoptimalkan metode pertanian.

Para petani di semua tempat akan memantau keadaan sektor pertanian. Pertanian cerdas bertenaga IoT sangat efektif dibandingkan metode konvensional. Penggunaan budi daya cerdas berbasis IoT tidak hanya menekankan pada praktik pertanian konvensional skala besar tetapi juga meningkatkan pola spesifik lainnya dan meningkatkan peluang pertanian, seperti pertanian organik. Dalam hal masalah perubahan iklim, tren pertanian berbasis IoT dapat memberikan manfaat besar seperti penggunaan air yang efisien, mengoptimalkan input dan perawatan yang diperlukan, dan sebagainya. Dalam situasi ini, semua tentang implementasi besar-besaran pertanian pintar berbasis IoT telah menjadi bidang yang menarik. Inovasi teknologi telah meningkat dari waktu ke waktu serta *drone* yang digunakan dalam pertanian adalah ilustrasi yang sangat baik untuk ini.

Produksi pertanian merupakan salah satu perusahaan besar yang menggunakan *drone* dalam situasi pasca-Covid-19. Dalam pertanian, *drone* digunakan untuk meningkatkan praktik pertanian yang berbeda. Proses di bidang pertanian yang dilakukan *drone* berbasis permukaan dan udara adalah irigasi, evaluasi kesehatan tanaman, panen, inspeksi benih, penanaman, dan pemeriksaan tanah. Banyak manfaat penggunaan *drone* termasuk pemantauan kualitas tanaman, kemudahan penggunaan, analisis GIS otomatis, peningkatan kapasitas hasil, dan penghematan waktu. Sistem *drone* memberikan perubahan teknologi tinggi pada lingkungan pertanian, dengan persiapan dan kebijakan yang berfokus pada pengumpulan dan analisis data *real-time*. Menggunakan data yang terkumpul dari *drone* dapat memberi kita visibilitas ke ukuran pertumbuhan tanaman, estimasi lahan, pemantauan tanaman, pelacakan tutupan kanopi, perhitungan persentase perkecambahan, pelacakan air lahan, perhitungan stok, laporan kepanduan, pengukuran nitrogen butir, pengukuran klorofil, pemetaan irigasi, visualisasi tekanan tanaman, dan banyak lagi. Dalam situasi pandemi ini, *drone* juga bekerja sebagai pengiriman persediaan, memantau dan memastikan kepatuhan terhadap *lockdown*, dan penyemprotan bahan kimia disinfektan.

C. Inovasi Layanan Pesan-Antar Pangan Menggunakan *Drone* Pasca-Merebaknya Covid-19

Dunia telah menyaksikan munculnya berbagai teknologi inovatif. Secara khusus, *drone* membuka kemungkinan tak terbatas dalam industri layanan pengiriman pangan. Selain itu, *drone* dianggap sebagai solusi inovatif untuk kelemahan metode pengiriman pangan yang ada, seperti mobil atau sepeda motor, yang melibatkan lalu lintas jalan raya yang padat dan mencemari lingkungan. Meskipun layanan pengiriman pangan berbasis *drone* saat ini tidak diizinkan untuk penggunaan sipil dan komersial di banyak negara, terdapat penelitian berfokus pada pengembangan dan penerapan prosedur. Misalnya, *start-up* Irlandia, Manna, telah melakukan beberapa ratus

penerbangan uji setiap hari untuk membuka jalan bagi layanan pengiriman pangan *drone* permanen di pinggir Dublin. Dalam lingkungan saat ini, *drone* dimanfaatkan untuk diterjemahkan ke dalam penggunaan dalam layanan pengiriman pangan dalam waktu yang tidak terlalu lama.

Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) (2020), penyakit coronavirus (Covid-19), yang pertama kali terdeteksi di Wuhan, Tiongkok, pada Desember 2019, adalah penyakit menular yang disebabkan oleh novel coronavirus. Badan tersebut juga merilis bahwa virus Covid-19 menyebar terutama melalui sistem pernapasan orang yang terinfeksi. Akibatnya, praktik jarak sosial direkomendasikan sebagai metode untuk mengurangi penularan dari manusia ke manusia. Demikian juga pihak berwenang di seluruh dunia telah mengumumkan dan menerapkan berbagai tindakan kesehatan masyarakat, yang mencakup isolasi mandiri dan membatasi pergerakan orang. Misalnya, warga di Italia mengalami pemberlakuan tinggal di rumah selama hampir dua bulan, yang merupakan penguncian terlama di Eropa. Pemerintah di Korea menjalankan kampanye agar orang-orang menahan diri dari kegiatan di luar ruangan dan mematuhi panduan jarak fisik untuk membendung virus corona. Beberapa negara secara bertahap melonggarkan aturan dan regulasi. Namun, masih banyak tempat di mana jarak sosial diberlakukan sampai batas tertentu, dan itu akan menjadi norma bahkan setelah Covid-19.

Teori perilaku terencana/*theory of planned behavior* (TPB) adalah kerangka kerja yang diajukan oleh Ajzen (1991) untuk memahami perilaku konsumen. TPB mendalilkan bahwa niat perilaku individu ditentukan oleh sikap, norma subjektif, dan kontrol perilaku yang dirasakan (Ajzen, 1991). Teori multi-atribut ini telah lama mendominasi upaya untuk menjelaskan perilaku/niat individu dalam industri perhotelan. Selain itu, banyak upaya memasukkan variabel tambahan ke dalam TPB telah dilakukan untuk meningkatkan daya prediksi niat perilaku konsumen. Misalnya, Yang dkk. (2017) mengusulkan kerangka teoretis yang didasarkan pada TPB dengan fasilitator dan hambatan tambahan untuk menyelidiki penerimaan individu terha-

dap layanan rumah pintar dengan lebih baik. Baru-baru ini, Hwang dkk. (2020) berfokus pada peran *drone* pro-lingkungan dalam layanan pengiriman pangan, dan mereka memperdalam TPB dengan kesadaran akan konsekuensi sebagai moderator utama untuk menjelaskan pembentukan niat perilaku konsumen.

Sementara itu, dalam ranah adopsi teknologi, banyak penelitian yang memperhatikan konsep persepsi inovasi, yang mengacu pada persepsi konsumen bahwa berbagai produk/jasa melibatkan atribut inovasi, seperti kebaruan dan keunikan. Tantangan inovasi, yaitu pengembangan produk/layanan baru yang sesuai dengan kebutuhan konsumen dan pasar tidak dapat dihindari dalam persaingan pasar saat ini. Demikian juga, banyak penelitian mengartikulasikan peran inovasi yang dirasakan untuk menciptakan keunggulan kompetitif dan menghasilkan peluang yang lebih baik dengan adopsi konsumen terhadap teknologi baru (Ahlstrom, 2010; Hwang dkk., 2019; Ottenbacher & Harrington, 2009; Seebode dkk., 2012). Oleh karena itu, literatur menunjukkan bahwa pemahaman yang jelas akan persepsi konsumen tentang inovasi sangat penting untuk menjelaskan sikap mereka terhadap produk atau layanan baru.

Wabah virus corona telah menyebabkan tekanan kuat untuk menawarkan/menerima layanan tanpa kontak manusia. Meskipun tidak selalu layak untuk berpisah, orang lebih cenderung menghindari kontak manusia kecuali jika sangat penting. Dengan demikian, *lock-down* dan pembatasan selama pandemi virus corona telah mengubah kebiasaan dan perilaku konsumsi pangan masyarakat. Dengan kata lain, lebih banyak orang menetap di rumah selama hari-hari *social distancing*, yang telah meningkatkan permintaan layanan pengiriman pangan dengan hati-hati untuk menghindari kontak manusia ke manusia.

Praktisi layanan pangan telah menanggapi perubahan yang cukup besar tersebut dan mengadopsi model bisnis mereka menjadi lebih fleksibel yang melibatkan tindakan pencegahan ekstra dalam meminimalkan kontak manusia seperti protokol sanitasi yang diperluas, lebih banyak pilihan *take-away*, *drive-through*, dan *delivery*. Pihak

berwenang juga terus membagikan dan menyarankan praktik terbaik dalam mengelola pengambilan dan pengiriman pangan untuk melindungi karyawan dan pelanggan. Namun, ketakutan akan kontak manusia lebih-lebihkan karena meningkatnya kasus Covid-19 (WHO, 2020). Selain itu, ada beberapa insiden terkait layanan pengiriman sehingga lebih dari 72 keluarga di New Delhi terpaksa melakukan karantina mandiri setelah seorang pengantar pizza dinyatakan positif Covid-19 (India Today, 2020). Lingkungan baru ini telah memusatkan perhatian pada *drone*, yang tidak memerlukan kontak tatap muka selama layanan pengiriman pangan. Karena *drone* dirancang untuk hanya menurunkan pangan di pintu depan pelanggan tanpa bertemu dengan manusia. Oleh karena itu, *drone* dianggap sebagai alat cerdas untuk pengiriman tanpa kontak yang menjadi lebih penting karena Covid-19.

1. Peran *Drone* dalam Layanan Pengiriman Pangan selama Covid-19

Drone didefinisikan sebagai kendaraan udara tak berawak yang terbang secara mandiri di lingkungan alami dan buatan manusia (Floreano & Wood, 2015). Penerapan *drone* telah sering dihubungkan dengan potensi yang sangat besar di berbagai sektor, meliputi praktik pertanian, pengawasan kontrol, manajemen bencana, pelestarian lingkungan, dan operasi transportasi. Layanan pengiriman *drone* meningkatkan kualitas layanan di daerah padat atau terpencil dengan nilai premium dari aksesibilitas yang luar biasa dan kecepatan yang unggul dibandingkan dengan mode pengiriman konvensional lainnya.

Kanada, Tiongkok, dan Australia adalah beberapa negara pertama yang mengizinkan *drone* komersial. Selanjutnya, pengiriman pangan dari udara dengan *drone* juga diuji di negara berkembang lainnya. Sebagai contoh, Zomato, yang merupakan salah satu perusahaan teknologi pangan terbesar di India, mengumumkan keberhasilan tes pengiriman pangan menggunakan *drone* pada Juni 2019. Terdapat total 13 perusahaan pengiriman yang baru-baru ini telah diberikan izin untuk menggunakan *drone* untuk layanan pengiriman pangan

di India. Meskipun demikian, mengomersialkan layanan pengiriman pangan *drone* telah berada di kutub yang berlawanan dalam perdebatan. Sekelompok orang menyambut baik penerapan *drone* dalam layanan pengiriman pangan berdasarkan berbagai manfaat yang disebutkan di atas, sedangkan beberapa lainnya menyatakan berbagai keprihatinan dan ingin membatasi penerapan ide ini (Clothier dkk., 2015). Demikian juga, Hwang dan Choe (2019) meneliti bagaimana konsumen merasakan hasil buruk yang tidak terduga dengan menggunakan layanan pengiriman pangan menggunakan *drone* dan dampaknya terhadap perilaku konsumen. Hasil mereka menentukan bahwa risiko waktu, risiko kinerja, dan risiko psikologis memberikan pengaruh negatif pada citra layanan pengiriman pangan berbasis *drone*. Singkatnya, dapat dikatakan bahwa orang memiliki campuran persepsi yang berbeda mengenai layanan pengiriman pangan *drone* yang menyoroti pro dan kontra. Dengan demikian, masih banyak negara yang membatasi penggunaan komersial *drone* untuk layanan pengiriman pangan.

Ada juga minat yang meningkat pesat pada *drone* dan pesawat tanpa pilot. *Drone* telah membuktikan fleksibilitas, efisiensi, dan efektivitasnya dalam beradaptasi dengan berbagai lingkungan dan kondisi. Jelas, jangkauan luas dan kesederhanaan aplikasi telah membuat banyak profesional berfokus pada pengembangan teknologi ini



Sumber: Kelso (2019)

Gambar 10.2 Contoh *Drone* Uber Eats untuk Pengiriman Pangan

dan memanfaatkannya secara maksimal untuk tujuan yang berbeda. Pengecer global terkemuka, seperti Amazon dan Walmart, secara konsisten mengeksplorasi cara terbaik untuk menyesuaikan kendaraan udara tak berawak (UAV) untuk mengirimkan barang ke konsumen. Bagi konsumen di daerah terpencil yang tidak dapat diakses oleh infrastruktur jalan atau kereta api, penggunaan *drone* menjanjikan untuk mengatasi tantangan infrastruktur tersebut. Saat ini, banyak perusahaan terkenal dan mapan seperti Amazon, Google, dan DHL tertarik pada aplikasi dan kemampuan *drone* yang canggih dan telah menerapkan teknologi ini dalam pengiriman paket mereka ke konsumen (Ball dkk., 2015). Pengiriman skala kecil dan pengiriman pangan juga dapat diselesaikan menggunakan *drone* dengan modifikasi robot. Namun, ada tantangan untuk penerapan yang luas dari inovasi teknologi ini dalam komponen pengiriman dari rantai pasok pangan. Tantangan ini dapat dikaitkan terutama dengan biaya tinggi yang terkait dengan peningkatan kendaraan atau penyewaan UAV yang terjangkau oleh pengecer untuk mengirimkan pangan ke tangan konsumen, yang pada gilirannya akan memengaruhi harga produk yang dikirimkan.

Sejak merebaknya Covid-19 pada Desember 2019, masyarakat mulai mengalami gaya hidup baru, termasuk *social distancing*, berdasarkan bukti saat ini bahwa virus corona menyerang tubuh melalui sistem pernapasan. Hal ini juga menyebabkan peraturan di banyak negara yang memaksa orang untuk mempraktikkan *social distancing*, termasuk menjaga jarak setidaknya 6 kaki dari orang lain untuk menghindari terpapar virus corona. Misalnya, Karim dkk. (2020) menggambarkan bagaimana pemerintah di Malaysia telah memberlakukan perintah pengendalian mobilitas untuk mencegah penyebaran Covid-19. Hingga 8 September 2020, 27,24 juta kasus dan 891.031 kematian telah dikonfirmasi akibat virus corona. Namun, tidak ada vaksin atau perawatan yang ditemukan untuk mengendalikan virus corona pada saat itu (WHO, 2020). Dengan demikian, kebutuhan orang-orang untuk bergantung pada langkah-langkah *social distancing* meningkat untuk mengatasi perjuangan panjang melawan Covid-19.

Tren ini memengaruhi industri jasa pangan karena orang-orang juga menyesuaikan diri dengan cara konsumsi pangan yang baru. Dengan kata lain, permintaan layanan pesan-antar pangan meningkat drastis karena masyarakat diimbau untuk tetap berjauhan dan tetap berada di rumah masing-masing untuk menghentikan penyebaran virus corona. Selain itu, opsi pengiriman tanpa kontak umumnya diterima oleh orang-orang karena sifat virus corona yang sangat menular. Oleh karena itu, layanan pengiriman pangan tanpa kontak diperlukan untuk menghindari kontak manusia antara petugas pengiriman dan pelanggan. Demikian juga, *drone* telah muncul sebagai solusi ideal untuk layanan pengiriman pangan tanpa kontak manusia ke manusia dan telah menarik perhatian selama pandemi Covid-19 (The Times, 2020).

Menurut Research and Markets (2020), *drone* yang digunakan selama masa pandemi Covid-19 diketahui memiliki lima peran berbeda, yaitu deteksi virus, penyemprot, pengiriman pangan, pengawasan, dan pengiriman medis darurat. Artinya, *drone* lebih ditonjolkan sebagai alat inovatif untuk mengirimkan pangan penting kepada individu yang terisolasi atau pasien. *Social distancing* akan menjadi praktik umum dan praktisi industri, sehingga harus ditemukan teknik baru untuk menyajikan pangan dengan interaksi manusia yang minimal atau tanpa interaksi manusia. Oleh karena itu, perubahan gaya hidup yang merupakan normal baru lainnya, dan tuntutan peningkatan pengiriman pangan secara *contactless* diterapkan tidak hanya pascapandemi, tetapi dalam jangka panjang. *Drone* dalam layanan pengiriman pangan saat ini belum dimanfaatkan sehubungan dengan komersialisasi massal, tetapi layanan tersebut menjadi lebih layak sekarang karena membantu mengatasi perubahan permintaan setelah merebaknya Covid-19.

2. Inovasi yang Dirasakan

Sektor industri telah berusaha meningkatkan kompetensi teknologi mereka melalui inovasi. Inovasi mengacu pada pembaruan dan perluasan jangkauan produk dan layanan serta pasar terkait; penetapan

metode produksi, pasokan dan distribusi baru; pengenalan perubahan dalam manajemen, organisasi kerja, kondisi kerja, dan keterampilan tenaga kerja. Suatu inovasi hanya ada jika dirasakan oleh konsumen. Suatu inovasi juga tergantung pada tingkat inovasi yang berbeda yang dirasakan konsumen dan membedakan inovasi yang dirasakan dari inovasi produk. Secara spesifik, persepsi inovasi menggambarkan betapa baru suatu produk atau layanan. Di sisi lain, inovasi produk berkaitan dengan karakteristik inovasi mendasar, seperti keunggulan dan kompatibilitas. Demikian juga, inovasi yang dirasakan didefinisikan sebagai “tingkat kebaruan dan perbaikan yang dirasakan atas alternatif yang ada.” Dengan demikian, inovasi yang dirasakan adalah tingkat kebaruan yang dialami konsumen terhadap layanan pengiriman pangan berbasis *drone* berdasarkan karakteristik mereka.

Banyak akademisi menunjukkan bahwa inovasi yang dirasakan membantu perusahaan untuk mendapatkan keunggulan kompetitif di pasar dan memainkan peran penting dengan penerimaan konsumen terhadap teknologi baru. Pengaruh signifikan dari persepsi konsumen tentang kebaruan atau kesegaran produk pada tanggapan mereka meliputi sikap terhadap merek dan niat untuk membeli produk baru. Shams dkk. (2015) menjelaskan hubungan antara inovasi produk yang dirasakan konsumen, inovasi perusahaan, inovasi merek, dan mereka mengartikulasikan bagaimana persepsi inovasi konsumen memengaruhi kehidupan sehari-hari dan mengubah perilaku konsumen. Fantinato dkk. (2018) mempelajari persepsi inovasi terhadap mainan pintar, yang muncul sebagai mainan edukatif dan menghibur, mereka memvalidasi dampak positif dari inovasi yang dirasakan pada evaluasi konsumen secara keseluruhan. Aliran studi yang ada ini menunjukkan bahwa ketika seorang individu merasakan tingkat inovasi yang tinggi dari suatu produk atau layanan, dia menunjukkan respons positif, seperti sikap yang menguntungkan dan niat yang lebih besar untuk membeli, menggunakan, atau menyebarkan hal positif dari mulut ke mulut. Oleh karena itu, ini sangat penting untuk keberhasilan difusi teknologi baru.

3. *The Theory of Planned Behavior* (Teori Perilaku Terencana)

Theory of planned behavior (TPB) atau biasa dikenal juga sebagai *theory of reasoned action* (TRA), dalam bahasa Indonesia disebut teori perilaku terencana, diusulkan oleh Ajzen dan Fishbein (1980). TPB tidak hanya mempertimbangkan keyakinan perilaku dan keyakinan normatif, seperti yang diusulkan dalam TRA, tetapi juga keyakinan kontrol yang berisi sumber daya dan peluang yang dimiliki oleh seorang individu. Di antara tiga faktor penentu yang mendorong niat perilaku dalam TPB, sikap adalah konstruksi pertama yang mengacu pada “sejauh mana seseorang memiliki penilaian perilaku yang disukai atau tidak disukai”. Untuk lebih spesifik, TPB memprediksi kapan individu memiliki sikap yang lebih baik dan kapan mereka memiliki kecenderungan untuk melakukan perilaku tertentu. Kedua, norma subjektif mewakili sejauh mana seseorang merasa bahwa orang lain yang signifikan menginginkannya untuk bertindak dengan cara tertentu.

Dalam TPB, niat yang lebih besar untuk mematuhi perilaku tertentu terbentuk ketika orang-orang yang penting bagi diri mereka sendiri percaya bahwa mereka harus terlibat dalam perilaku itu. Konstruksi terakhir, yang dirasakan kontrol perilaku, mencerminkan persepsi dari kedua kendala internal dan eksternal pada perilaku. Dengan kata lain, TPB mendalilkan bahwa dengan tingkat kontrol perilaku yang dirasakan lebih tinggi, kemungkinan besar seseorang berniat untuk berperilaku. Di bidang teknologi, kontrol perilaku yang dirasakan umumnya menggambarkan tingkat pengetahuan individu, tingkat keterampilan, sumber daya yang memadai, dan pengalaman yang diperlukan terkait dengan penggunaan teknologi.

TPB adalah salah satu teori yang paling banyak dikutip dalam menjelaskan niat perilaku konsumen dalam literatur. Di sisi lain, banyak ahli mencakup faktor eksternal dalam dasar TPB untuk meningkatkan utilitas prediktifnya dengan niat perilaku konsumen. Secara khusus, meskipun TPB divalidasi sebagai kerangka kerja yang unggul untuk menjelaskan perilaku konsumen dalam banyak peneli-

tion, ada juga upaya untuk memperluas TPB untuk meningkatkan nilai prediktifnya dalam domain penerimaan teknologi. Misalnya, Chen dan Li (2010) mengintegrasikan kesiapan teknologi dengan TPB untuk pemahaman adopsi konsumen terhadap *e-service*. Yang (2012) menambah TPB dengan konstruksi kegunaan dan kenikmatan yang dirasakan untuk menguji faktor-faktor penentu adopsi konsumen dalam konteks belanja *mobile*. Ramadan dkk. (2017) mengadopsi potensi manfaat fungsional, atribut relasional, dan risiko yang dirasakan ke dalam TPB untuk membahas niat konsumen untuk menerima penggunaan pengiriman menggunakan *drone*. Baru-baru ini, Jing dkk. (2019) mengeksplorasi faktor-faktor yang memengaruhi niat konsumen kendaraan nir Sopir, dan mereka berhasil menjelaskan niat pilihan individu melalui TPB, yang melibatkan pengetahuan dan risiko yang dirasakan.

4. Perilaku Konsumen terhadap Pengiriman Pangan Menggunakan *Drone*

Wabah Covid-19 baru-baru ini telah membawa perubahan besar pada gaya hidup kita, termasuk cara mengonsumsi pangan. Perubahan drastis dalam konsumsi pangan masyarakat termasuk peningkatan layanan pengiriman pangan dan kebutuhan layanan dengan kontak non-manusia. Dengan demikian, banyak pengusaha telah berusaha untuk merancang lingkungan tanpa kontak untuk layanan pengiriman pangan, dan *drone* saat ini menerima lebih banyak perhatian daripada sebelumnya. Dalam hal ini, bagian ini berusaha memahami tidak hanya pembentukan niat perilaku terhadap layanan pengiriman pangan berbasis *drone* tetapi juga kemungkinan perubahan dalam pembentukan niat perilaku individu menggunakan *drone* untuk layanan pengiriman pangan selama pandemi Covid-19.

Inovasi yang dirasakan memegang peran penting dalam membangun sikap konsumen terhadap layanan pengiriman pangan menggunakan *drone*. Kondisi ini konsisten dengan hasil penelitian (misalnya Hwang dkk., 2019; Mamun & Kim, 2018), yang memberikan bukti empiris untuk dampak kuat dari inovasi yang dirasakan

pada sikap dengan adopsi teknologi baru oleh konsumen. Oleh karena itu, kondisi ini menggemakan temuan sebelumnya dan memvalidasi kesesuaian TPB yang diperluas dengan bukti dalam konteks layanan pengiriman pangan oleh *drone*.

Drone telah menerima banyak perhatian dalam beberapa tahun terakhir berdasarkan fungsionalitas canggih dan kegunaannya dalam berbagai aspek, seperti menghemat waktu dan menavigasi area yang tidak dapat diakses. Dengan kata lain, persepsi masyarakat umum mungkin telah dibangun sedemikian rupa bahwa *drone* itu baru, unik, dan kreatif. Dengan demikian, kita bisa mengatakan bahwa inovasi *drone* sudah dirasakan dengan baik sebelum pecahnya virus Covid-19. Apabila dibandingkan mode pengiriman pangan saat ini, menggunakan *drone* untuk layanan pengiriman pangan layak mendapat banyak pujian karena mereka adalah cara yang ideal untuk menghindari kontak manusia yang tidak perlu. Ini mungkin akan meningkatkan ketertarikan masyarakat mengenai penggunaan layanan pengiriman pangan berbasis *drone* setelah merebaknya virus Covid-19. Sementara itu, *drone* telah dikomersialkan di sebagian belahan dunia sebelum munculnya Covid-19, dan orang mungkin menganggap bahwa mereka memiliki sumber daya dan peluang yang cukup untuk menggunakan *drone* dalam layanan pengiriman pangan jika mereka mau.

Dalam aspek manajerial, profesi dalam layanan pengiriman pangan direkomendasikan untuk mempromosikan *drone* sebagai alat pengiriman pangan yang kreatif dan unik, karena dampak penting dari inovasi yang dirasakan terhadap sikap konsumen. Dengan kata lain, *drone* dalam layanan pengiriman pangan harus dicitrakan sebagai mode pengiriman yang baru ditemukan. Oleh karena itu, perusahaan yang bergerak di bidang layanan pesan-antar pangan harus memasang iklan yang ekstensif untuk memperkenalkan bagaimana *drone* dalam layanan pesan-antar pangan menambah nilai layanan pesan-antar pangan saat ini, yang umumnya dikelola dengan mobil atau sepeda motor. Sarana pengiriman yang ada untuk layanan pengiriman pangan ditangani dengan beberapa masalah yang berkaitan dengan efisiensi, keamanan, dan lingkungan. Demikian

juga, komunikasi pemasaran yang menunjukkan manfaat penggunaan *drone* untuk layanan pengiriman pangan dibandingkan dengan mode pengiriman konvensional dapat membantu meningkatkan persepsi layanan pengiriman pangan berbasis *drone* sebagai alat inovatif. Ini berarti bahwa kemampuan *drone* yang canggih, yang mencakup efisiensi superior dan kerusakan lingkungan yang lebih sedikit, harus disematkan dalam berbagai jenis komunikasi untuk menghasilkan persepsi tentang kebaruan layanan pengiriman pangan oleh *drone*. Selanjutnya, biaya pengiriman pangan menggunakan sepeda listrik dua kali lipat dari biaya pengiriman pangan menggunakan *drone* (Doole dkk., 2018). Jenis manfaat ini juga akan menjadi petunjuk yang kuat untuk pertimbangan layanan pengiriman pangan oleh *drone* di negara-negara berkembang. Sikap positif meningkatkan niat untuk menerima layanan pengiriman pangan oleh *drone*, yang pada dasarnya penting untuk menanamkan inovasi *drone* ke dalam pikiran masyarakat.

Operator pengiriman pangan direkomendasikan untuk memperhatikan dorongan dari mulut ke mulut yang memvalidasi manfaat teknologi *drone* dan perilaku konsumen dalam konteks layanan pengiriman pangan oleh *drone*. Melibatkan konsumen potensial dalam komunikasi dari mulut ke mulut dianggap lebih kuat daripada kegiatan dan saluran pemasaran lainnya (Fu dkk., 2015). Oleh karena itu, *drone* untuk layanan pengiriman pangan harus memiliki banyak topik, yang berarti bahwa pengusaha harus menawarkan topik, cerita, dan acara inovatif kepada masyarakat umum yang terkait dengan layanan pengiriman pangan berbasis *drone* untuk memotivasi dan menginspirasi individu untuk menyebarkan pendapat positif dari kemauan mereka sendiri dan membuat konten promosi di media sosial. Misalnya, para praktisi dapat mempertimbangkan untuk mengadakan kompetisi pengiriman pangan *drone* dan mengundang orang-orang melihat eksperimen kemampuan *drone* yang baru dalam konteks pengiriman pangan.

Cara lain untuk mempromosikan dari mulut ke mulut adalah meminta konsumen menilai pengalaman layanan dan memberikan

komentar tentang layanan pengiriman pangan berbasis *drone*. Misalnya, *chatbots* dapat digunakan untuk mendorong umpan balik tepat setelah penggunaan *drone* untuk layanan pengiriman, dan setiap komentar dari pelanggan dapat digunakan untuk meningkatkan tingkat norma subjektif, yang pada akhirnya akan meningkatkan niat perilaku. Selain itu, ada peluang untuk mendorong pengetahuan konsumen yang lebih menguntungkan ketika layanan pengiriman pangan oleh *drone* dibayangkan sebagai mode layanan yang melindungi lingkungan karena orang umumnya mendukung konsumsi yang mengurangi beban lingkungan. Dengan demikian, penyedia layanan di industri pengiriman pangan harus mengenali dan menekankan kontribusi substansial *drone* dengan keberlanjutan. Selain itu, inisiasi ini dapat dikelola secara efektif melalui kemitraan dengan sekelompok orang yang memiliki tingkat pengaruh lingkungan yang tinggi karena mereka berkontribusi untuk menciptakan lingkungan yang ramah lingkungan melalui berbagai kegiatan.

Terakhir, penyakit menular mengubah perilaku individu dan konsumen secara radikal mengubah perilaku mereka dengan konsumsi pangan selama pandemi Covid-19. Lebih khusus lagi, peran penggunaan *drone* untuk layanan pengiriman pangan akan meningkat selama periode pasca-Covid-19. Faktanya, beberapa pembuat kebijakan baru-baru ini mengizinkan layanan pengiriman pangan berbasis *drone* karena kebutuhan pengiriman tanpa kontak yang drastis selama pandemi Covid-19 (The Week, 2020). Oleh karena itu, praktisi di industri pengiriman pangan juga disarankan untuk mendokumentasikan kasus terkini tentang bagaimana *drone* untuk pengiriman berkontribusi untuk menghindari kontak manusia ke manusia selama krisis virus Covid-19. Akumulasi kasus nyata ini kemudian dapat digunakan untuk sepenuhnya mengomersialkan layanan pengiriman pangan berbasis *drone* di masa depan. Artinya, para ahli di bidang industri pengiriman pangan harus menggunakan informasi ini sebagai data pendukung untuk mendamaikan aturan dengan otoritas terkait untuk mengaktifkan layanan pengiriman pangan berbasis *drone* di lebih banyak tempat.

Berdasarkan aplikasi *drone* saat ini dalam layanan pengiriman pangan selama Covid-19, orang akan menganggap *drone* sebagai solusi ideal untuk pengiriman pangan tanpa risiko tinggi kontak manusia ke manusia. Oleh karena itu, disarankan untuk menekankan operasi layanan pengiriman pangan berbasis *drone* yang tanpa kontak. Peran *drone* di masa pandemi Covid-19 harus disikapi secara luas di berbagai saluran, termasuk media. Misalnya, opsi baru *drone* dalam layanan pengiriman pangan dapat dipasang dengan citra pahlawan selama Covid-19, dan konsep alat pengiriman tanpa kontak untuk layanan pengiriman pangan. Sementara itu, para profesional harus mampu mengelola berbagai jenis mode pengiriman untuk mengatasi kasus serupa dalam jangka panjang. Dengan kata lain, memiliki beragam mode pengiriman yang tersedia setiap saat akan memungkinkan mereka untuk beralih ke metode pengiriman yang lebih sesuai dalam keadaan darurat dan mengusulkannya kepada konsumen tanpa penundaan untuk menemukan solusi alternatif setelah terjadinya sebuah situasi.

Seperti telah disampaikan sebelumnya bahwa *drone* sangat erat kaitannya dengan munculnya IoT, robotika, ilmu data, dan AI, teknologi ini akan berpotensi menjadi alat yang berguna bagi petani kecil untuk memperkaya mata pencaharian mereka dan memberikan beragam peluang bagi pedesaan. Mengingat kita telah mempelajari IoT, *big data*, dan AI di bab sebelumnya, maka Bab XI mulai membahas teknologi robotika dan sistem otonom dalam bidang industri pangan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB 11

Peran Teknologi Robotika dan Sistem Otonom

A. Menyambut Robotika dan Sistem Otonom

Peningkatan populasi global berarti pemanfaatan sumber daya dan ketahanan pangan tetap menjadi tantangan global yang semakin kritis. Robotika dan sistem otonom/*robotics and autonomous system* (RAS) telah diterapkan untuk meningkatkan produktivitas. Peran mereka dalam meningkatkan operasi rantai pasok dibahas dalam bab ini.

Industri pangan, sebagaimana diakui dalam Tujuan Pembangunan Berkelanjutan, memiliki peran penting dalam menyediakan produk makanan dan minuman. Krisis pangan mengakibatkan gangguan akses terhadap kualitas dan kuantitas pangan dan gizi yang sesuai, dan ini diidentifikasi sebagai risiko global dalam masyarakat. Peningkatan populasi global dan pendapatan pribadi di negara berkembang akan meningkatkan permintaan pangan sebesar 59% hingga 98% pada tahun 2050 (Schierhorn & Elferink, 2016). Ini membutuhkan fokus pada peningkatan produktivitas melalui adopsi teknologi baru seperti robotika dan sistem otonom (RAS).

RAS bukanlah konsep baru RAS digunakan dalam industri pariwisata untuk *check-in* atau pengiriman barang, dalam industri konstruksi untuk pembangunan gedung bertingkat, dan dalam transportasi dengan truk swakemudi. Dalam industri *agri-food* atau pertanian pangan, istilah “*Agri-food 3.0*” muncul pada akhir abad kedua puluh, mengacu pada RAS. Contoh pengaplikasiannya terdapat pada sistem pemerahan susu otomatis dan sistem pengawasan di lahan pertanian seperti sistem pemantauan kelembapan tanah. Pengembangan RAS didorong dengan alasan: (1) dapat diterapkan di area berbahaya, (2) memberikan efisiensi tinggi, (3) memberikan solusi hemat biaya, (4) menghindari kelelahan karyawan, atau (5) mendukung kerja sama dengan operator.

Suprem dkk. (2013) meninjau teknologi yang diadopsi dalam industri pangan dan menekankan atribut utama untuk aplikasinya. Bouzembrak dkk. (2019) menyelidiki teknologi dan kemampuan untuk penggunaan *Internet of Things* dalam keamanan pangan, Dalam hal ini ditekankan bahwa penggunaan teknologi dalam aspek keamanan pangan adalah area yang menjanjikan untuk mengatasi tantangan dalam rantai pasok pangan. Lezoche dkk. (2020) meninjau teknologi dan proses pengambilan keputusan rantai pasok di industri pangan. Penelitian tersebut meningkatkan pemahaman tentang arah masa depan industri pangan. Masing-masing studi ini berfokus pada aplikasi RAS dari perspektif teknologi dan menganalisis tren masa depan untuk pengembangannya.

B. Aplikasi RAS dalam Bidang Pertanian dan Pangan

Industri pangan bergantung pada sumber daya manusia dengan penggunaan mesin yang terbatas dan permintaan yang meningkat. Di sisi lain, persaingan global dan teknologi canggih telah memfasilitasi pemanfaatan RAS dalam industri pertanian pangan. RAS digunakan di seluruh spektrum aplikasi yang luas dalam industri pangan dengan klasifikasi utama sebagai berikut.

1. Bidang Pertanian

a. Pemanen dan Robot Pertanian

Pemanenan merupakan tahap penting dari produksi pertanian dan dianggap sebagai kegiatan pertanian inti. Selain itu, sebagian besar panen buah masih dilakukan secara manual. Robot pemetik buah telah dikembangkan dengan kemampuan pemrosesan penglihatan dan memanfaatkan beberapa mekanisme pemetikan. Para peneliti telah menyelidiki dan mengembangkan metode penggunaan RAS untuk pemanenan buah (misalnya Bogue, 2020). Aplikasi pemanenan RAS untuk rumah kaca telah dikembangkan untuk memindahkan robot di dalam lingkungan tertutup yang dianggap lebih mudah. Utilisasi RAS meningkat pada operasi ini, dan diproyeksikan akan digunakan pada 20% operasi pemanenan di masa depan (Suprem dkk., 2013).

b. Industri Pengolahan Pangan

Berbeda dengan industri otomotif dan dirgantara, industri pengolahan pangan masih lambat dalam mengadopsi teknologi RAS, meskipun dapat meningkatkan produktivitas pengolahan pangan di pabrik dengan mengurangi biaya dan meningkatkan kualitas produk (Suprem dkk., 2013). Meskipun RAS diterapkan dalam rantai pasok, penggunaan robot kolaboratif (*cobot*) yang dapat bekerja berdampingan dengan tenaga manusia belum teruji. Integrasi *cobot* dapat mengubah industri pengolahan pangan, di mana kolaborasi yang aman dengan pekerja manusia dapat meningkatkan pemanfaatan pekerja berketerampilan tinggi dan mengurangi risiko kesehatan di dalam industri. Beberapa aplikasi RAS tidak memerlukan kontak langsung dengan robot, di mana pekerja manusia hanya memantau dan mengontrol jalur produksi dari jarak jauh. Biasanya, RAS penting digunakan ketika ada tugas yang memiliki bahaya terkait dengan pekerjaannya.

c. RAS untuk Peternakan dan Akuakultur

RAS sekarang secara teratur digunakan untuk pemerah susu hewan di perusahaan susu. Diperkirakan bahwa RAS akan tertanam di setengah dari industri susu di seluruh Uni Eropa pada tahun 2025 (Beekman & Bodde, 2015). Pasar robot pemerah susu global diperkirakan akan tumbuh 10,3% setiap tahun untuk mencapai nilai USD 3,127 miliar pada akhir tahun 2026 (Magnifier Research, 2020). RAS juga terlibat dalam kegiatan lain, seperti mengantarkan pakan ternak dan membuang sampah. Pemantauan ternak secara tradisional oleh pekerja manusia dapat menyebarkan kontaminasi dan berkontribusi pada bahaya kesehatan bagi operator. RAS dapat melakukan tugas tersebut secara teratur dalam operasi yang sebelumnya berbiaya tinggi.

Akuakultur merupakan peluang lain untuk RAS karena jenis lingkungan ini memiliki banyak tantangan dan kesulitan. Di sisi lain, terdapat aspek yang tidak bersahabat bagi operator, yakni lingkungan kerja yang dapat berbahaya, mengancam kesehatan dan keselamatan yang substansial, serta peningkatan biaya pengoperasian. Dengan demikian, penggunaan RAS dapat mengurangi jumlah operator, meningkatkan kondisi kerja, dan memastikan keselamatan.

2. Kontribusi RAS untuk Pangan

RAS membawa perubahan pada rantai pasok pangan. Perubahan tersebut mencakup aspek-aspek utama, termasuk kualitas pangan, keamanan pangan, limbah pangan, efisiensi rantai pasok, dan analisis rantai pasok.

a. Kualitas Pangan

Pengelolaan rantai pasok pangan diperumit oleh proses dan karakteristik produk yang spesifik. Salah satu karakteristik penting yang perlu dipertimbangkan adalah kualitas produk yang memburuk, tergantung pada kondisi lingkungan fasilitas transportasi dan penyimpanan. Pentingnya kualitas pangan telah dibahas secara luas setelah terjadinya *food recall*, misalnya pada insiden kontaminasi melamin yang tinggi. Selain itu, pergerakan produk pangan berdampak pada keberlanjutan

karena persyaratan pangan memiliki kisaran suhu dan kelembapan tertentu untuk menjaga kualitas. Sebagian besar studi yang meneliti kualitas pangan di pertanian, pabrik, atau gudang menggunakan visi komputer atau metode pemrosesan gambar (Trivelli dkk., 2019). Misalnya, pematangan buah dideteksi oleh rasa, warna, aroma, dan tekstur untuk memastikan kualitas buah dari sudut pandang konsumen. El-Bendary dkk. (2015) menyelidiki kematangan tomat dan teknik pembelajaran mesin yang digambarkan untuk mengevaluasi berbagai tahap kematangan tomat secara otomatis. Studi lain oleh Kurtulmuş & Kavdir (2014) menyelidiki jaminan kualitas jagung untuk memastikan hanya benih hibrida yang diproduksi.

Mengikuti kompleksitas pengelolaan faktor suhu dan kelembapan, kebutuhan informasi yang tepat waktu dan akurat di seluruh rantai pasok pangan merupakan tantangan signifikan bagi industri pangan. Teknologi cepat untuk penilaian otomatis dan pemantauan kualitas pangan adalah suatu keharusan. Dalam konteks ini, teknik pemrosesan citra, termasuk deteksi tepi, teknik ambang batas, atau tekstur, telah digunakan secara luas. Tsakanikas dkk. (2015) menyajikan metodologi untuk pemrosesan otomatis dan ekstraksi informasi dari sistem citra multispektral. Pekerjaan ini dapat dianggap sebagai langkah awal menuju pemantauan kualitas pangan secara otomatis dan tepat waktu di seluruh rantai pasok. Hal ini juga memungkinkan pengambilan sampel yang efisien dari 100% produk pangan secara tepat waktu dan dengan biaya rendah. Beberapa rantai pangan, misalnya restoran McDonald's dan Sushi, memasang sistem robotik lengkap untuk mengurus persiapan pangan, pembuatan pangan, dan distribusi pangan ke konsumen. Baru-baru ini, konsep *Cyber-Physical System* (CPS), sebuah domain penelitian berdasarkan konsep *Internet of Things*, telah mendapat perhatian yang kuat karena potensinya untuk merampingkan seluruh rantai pasok di sektor pangan. Haass dkk. (2015) mengikuti gagasan *Internet of Things*, mengembangkan algoritma yang memungkinkan kontainer berisi pisang membuat keputusan sendiri terkait konsumen dan rute pengiriman yang akan diambil. Hasil simulasi menunjukkan potensi untuk mengurangi emisi

karbon serta penurunan kualitas pisang di sepanjang rantai pasok. Studi-studi ini harus dianggap sebagai langkah penting menuju adopsi RAS ke dalam rantai pasok pangan. Pekerjaan di masa depan mungkin memvalidasi temuan ini pada skala yang lebih besar atau menyelidiki profitabilitas sistem ini.

b. Keamanan Pangan

Secara umum, keamanan pangan mengacu pada penghindaran penyakit akibat konsumsi pangan yang terkontaminasi. Isu keamanan pangan semakin ramai diperbincangkan melalui *product recall*, misalnya keberadaan salmonella pada ayam. Contoh lain yang terkenal dari krisis keamanan pangan adalah ditemukannya daging kuda di beberapa produk daging sapi serta peningkatan deteksi DNA babi di beberapa produk olahan “Halal” di Inggris. Meningkatnya perhatian terhadap keamanan pangan mungkin karena undang-undang yang semakin ketat dan motivasi ekonomi. Kegagalan atau penarikan kembali produk pangan dapat menjadi faktor yang menghancurkan dan sering kali menodai reputasi perusahaan.

Berbagai standar dan sistem telah dikembangkan untuk membantu perusahaan dalam mengelola masalah keamanan pangan. Salah satu contohnya adalah sistem *Hazard Analysis Critical Control Point* (HACCP) yang bertujuan untuk menganalisis dan mengendalikan bahaya biologis, kimia, dan fisik dari seluruh rantai pasok pangan. Ide inti dari HACCP adalah menawarkan metode terstruktur untuk mengidentifikasi risiko di sepanjang rantai pasok pangan dan jika memungkinkan dapat mengurangi atau menghilangkan risiko tersebut.

Penekanan dari sistem HACCP adalah ketertelusuran produk di sepanjang rantai pasok pangan. Pemerintah telah memberlakukan undang-undang untuk secara aktif mendorong ketertelusuran selama semua tahap budi daya, pengolahan, dan distribusi. Namun, sifat rantai pasok pangan yang kompleks dan saling berhubungan membatasi kemampuan untuk melakukan penelusuran dalam industri pangan. Dalam konteks ini, perusahaan pangan telah menggunakan RAS untuk mengatasi ketertelusuran dalam rantai pasok mereka.

Kshetri (2018) menggambarkan kisah sukses baru-baru ini bahwa Walmart menggunakan teknologi RFID untuk meningkatkan keamanan pangan di meja makan konsumen di Tiongkok. Dalam aplikasi ini, informasi seperti detail asal pertanian, suhu penyimpanan, data pemrosesan, tanggal kedaluwarsa, dan detail pengiriman dari ekosistem pemasok ke rak penyimpanan dan konsumen akhir dapat mengungkapkan data potensial tentang masalah keamanan pangan apa pun. Selain itu, Alfian dkk. (2017) memanfaatkan RFID dan jaringan sensor nirkabel untuk mengumpulkan suhu dan kelembapan selama penyimpanan dan transportasi kimchi di Korea Selatan. Sistem yang diusulkan membantu mengoptimalkan distribusi kimchi, memantau kesegaran, dan meningkatkan tingkat kepuasan konsumen. Namun, manfaat penuh dari RFID hanya dapat dicapai ketika semua perusahaan dalam rantai pangan menerapkan teknologi tersebut. Implementasi penuh dari teknologi RFID di seluruh rantai pasok menghasilkan biaya yang lebih tinggi bagi perusahaan. Karena kompleksitas jaringan pasokan pangan dan fakta bahwa sebagian besar perusahaan pangan berada dalam skala kecil dan menengah, persyaratan ini menjadi hambatan yang signifikan untuk mengadopsi RFID dalam rantai pasok pangan.

c. Sampah Pangan

Karena produksi pangan merupakan sumber daya yang intensif, limbah pangan memiliki dampak yang signifikan terhadap lingkungan, seperti polusi air dan udara, emisi gas rumah kaca, dan erosi tanah yang terjadi di semua tahap rantai pasok pangan. Sepanjang rantai pasok pangan, hampir sepertiga produk pangan yang layak dikonsumsi manusia terbuang atau hilang. Kekhawatiran lingkungan, sosial, dan ekonomi ini menyoroiti pentingnya masalah limbah pangan.

Sensor dan teknologi deteksi telah digunakan secara luas untuk memantau dan meminimalkan limbah pangan. Jagtap dkk. (2019) mengusulkan sistem otomatis dan *real-time* berdasarkan *Internet of Things* untuk memantau jumlah dan penyebab limbah kentang dalam rantai pasok kentang. Penelitian ini menunjukkan penggunaan

pemrosesan gambar modern dan teknologi *load cell* yang menangkap gambar kentang dan mengukur berat setiap kentang. Penelitian lain dari Eriksson dkk. (2019) bertujuan mengukur limbah pangan di sektor perhotelan menggunakan layanan berbasis internet di 735 hotel, restoran, dan kantin di Eropa dan mengidentifikasi faktor-faktor yang menciptakan limbah pangan. Selain penggantian tenaga kerja secara langsung, RAS dapat digunakan untuk memperluas kapasitas kognitif penggantian tenaga kerja. Noone dan Coulter (2012) berfokus pada aplikasi RAS untuk prediksi permintaan dan manajemen produksi untuk restoran cepat saji. Sistem yang diusulkan melacak kedatangan konsumen, proses memasak, kemudian memberikan arahan untuk mempercepat memasak dan layanan pelanggan. Menggunakan kasus *outlet* uji Zaxby, sistem yang diusulkan secara substansial mengurangi limbah pangan dan waktu layanan. Kendala program pengurangan limbah pangan adalah kurangnya standar untuk mengukur dan melaporkan limbah (Eriksson dkk., 2019). Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan RAS dalam pengelolaan limbah pangan masih merupakan bidang penelitian yang masih dini. Ini menyerukan kebutuhan untuk meningkatkan kesadaran tentang limbah pangan dengan mengembangkan kuantifikasi yang mudah diterapkan.

d. Efisiensi Rantai Pasok

Tema penelitian lain berfokus pada efisiensi rantai pasok, yakni mengacu pada berbagai indikator kinerja, seperti biaya keseluruhan, tingkat persediaan, dan kepuasan konsumen. Untuk mengukur indikator ini, investasi dalam teknologi informasi di antara mitra rantai pasok telah menjadi tujuan strategis. Telah terjadi peningkatan dalam penggunaan RFID dan sensor untuk meningkatkan efisiensi rantai pasok pangan. Ben-Daya dkk. (2019) menyarankan penggunaan RFID dan sensor untuk memungkinkan adopsi *Internet of Things* dalam rantai pasok pangan. Integrasi RFID dan sensor untuk pengambilan keputusan yang tepat merupakan aktivitas penting dalam rantai pasok pangan. Misalnya, RFID dapat meningkatkan pemantauan keamanan pangan, pelacakan *real-time*, atau manajemen operasi gudang yang meningkatkan volume penjualan dan profitabilitas.

Aplikasi lain digunakan untuk meningkatkan efisiensi rantai pasok termasuk melakukan kegiatan peternakan seperti pemangkasan, inspeksi, penyemprotan, sistem penilaian kondisi tubuh sapi perah secara otomatis, pemanenan otomatis, penyimpanan berpendingin otomatis, atau penjadwalan tugas di lingkungan pertanian yang kompleks. Keberhasilan aplikasi ini tergantung pada komunikasi antarrobot dan kemampuan menganalisis data. Gázquez dkk. (2016) menyelidiki penunjukan sistem telekontrol cerdas untuk mesin pertanian yang menawarkan solusi untuk robot dan manusia yang bekerja bersama di lingkungan pertanian, sedangkan Schuetz dkk. (2018) menghadirkan gudang yang dikendalikan berdasarkan data untuk mendukung analisis bisnis di peternakan sapi perah.

e. Analisis Rantai Pasok

Analisis rantai pasok harus dianggap sebagai tugas tanpa henti. Dalam lingkungan bisnis yang cepat berubah, mitra rantai pasok dan hubungan di antara mereka serta faktor internal dan eksternal dari rantai pasok terus berkembang. Dengan demikian, rantai pasok perlu mengakomodasi untuk melayani kebutuhan konsumen. Misalnya, karena atribut produk pangan yang cepat berubah, Duong dkk. (2018) mengusulkan penggunaan langkah-langkah non-keuangan untuk mengelola persediaan produk tersebut. Hasil dari analisis awal dapat digunakan sebagai titik awal atau untuk *benchmarking*. Analisis ini mencerminkan perubahan berkelanjutan dalam lingkungan bisnis. Dengan cara ini, RAS dapat memberikan informasi yang akurat dan tepat waktu untuk analisis rantai pasok.

Contoh tipikal dalam kategori ini adalah penggunaan robot dan *drone* dalam industri pangan. Robot bekerja sebagai pengantar, menerima produk pangan jadi dari dapur restoran dan meneruskannya ke konsumen yang dituju, sementara *drone* telah digunakan di peternakan untuk memantau proses dan parameter produksi. Teknologi ini masih dalam tahap awal tetapi telah menunjukkan beberapa hasil yang menjanjikan dan nyata. Contoh lain adalah penggunaan teknologi pencetakan makanan 3D yang memberikan solusi untuk pengem-

bangun produk pangan baru dan dapat mengonfigurasi ulang seluruh rantai pasok pangan (Sun dkk., 2015). Selain itu, Kaur dan Kaur (2018) mengusulkan sistem manajemen bahan pangan berbasis IoT dan *cloud* untuk organisasi empat unit otomatis: produsen, gudang, toko, dan konsumen. Sistem yang diusulkan membantu komunikasi antara empat unit ini dan membuat pengadaan bahan pangan lebih mudah bagi konsumen.

Contoh lain dalam kategori ini berkaitan dengan aplikasi yang menawarkan penggunaan kembali sumber daya alam yang lebih baik. Gružauskas dkk. (2018) menyajikan cara menggunakan kendaraan otonom untuk meminimalkan *trade-off* antara efek lingkungan dan kinerja hemat biaya. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa strategi kendaraan otonom yang diusulkan menurunkan tingkat CO₂ sebesar 22%. Nadal dkk. (2017) mengembangkan metodologi otomatis dengan sensor udara untuk mengidentifikasi kelayakan atap *greenhouse* di daerah perkotaan. Aplikasi ini tidak hanya membutuhkan data yang cukup dari lingkungan bisnis sekitar, tetapi juga kemampuan untuk analisis data. Oleh karena itu, diperlukan penggunaan data yang tersedia secara efektif sehingga analisis *big data* adalah sebuah pilihan.

C. Peran RAS

1. Rantai Pasok

Isu-isu kontemporer seperti keberlanjutan, keamanan pangan, dan ketahanan pangan memerlukan penerapan RAS dalam sektor pertanian dan mencakup seluruh rantai pasok. Upaya untuk meningkatkan efisiensi di suatu pertanian tidak serta-merta menguntungkan konsumen karena jaringan distribusi yang buruk. Namun, sebagian besar studi berfokus pada aplikasi RAS di pertanian. Hal ini mencerminkan kendala sifat dan struktur industri pangan. Sebuah rantai pasok pangan khas mungkin mencakup sejumlah besar mitra, seperti petani, pemasok, pengemasan, importir, eksportir, pengecer, dan konsumen. Struktur kompleks ini menghasilkan banyak interaksi. Semakin banyak jumlah mitra dalam rantai pasok pangan, semakin

banyak informasi yang dibagikan di antara mitra tersebut. Selain itu, di seluruh dunia, sebagian besar perusahaan dalam rantai pasok pangan dikategorikan sebagai usaha kecil dan menengah dengan keuangan dan sumber daya yang terbatas. Kompleksitas ini menghambat upaya kolaboratif untuk mengadopsi RAS dalam rantai pasok pangan. Selain itu, sistem ini memerlukan infrastruktur informasi untuk mengoperasikan dan memelihara. Hal ini mungkin menjadi hambatan teknis dan menghalangi akses perusahaan pangan.

Lebih lanjut, penerapan RAS dalam rantai pasok pangan masih berada dalam tahap awal. Hal ini sejalan dengan temuan yang disarankan dari studi *big data* dalam pertanian (Jagtap dkk., 2019) dan Industri 4.0. Studi-studi ini menyoroti terbatasnya jumlah aplikasi *Big Data* atau Industri 4.0 di industri pangan. Hal ini disoroti mungkin karena kendala keuangan dan tenaga kerja. Demikian pula saat melakukan tinjauan aplikasi pada teknologi *blockchain*, implementasi *blockchain* dalam rantai pasok pangan yang masih berada dalam tahap pengujian. Alasan kurangnya aplikasi RAS di industri pangan adalah karena industri ini membutuhkan standar tinggi untuk proses keamanan dan kebersihan. Selain itu, masalah seperti bahan baku pangan atau variasi produk dalam bentuk dan ukuran menjadi tantangan dalam metode pengukuran untuk bahan dan resep makanan. Di sisi lain, RAS adalah teknologi yang menjanjikan. Banyak upaya yang tidak berhasil dalam menggantikan manusia dengan robot untuk kegiatan semacam ini karena ketersediaan tukang reparasi bersertifikat dan biaya yang tinggi. Dengan demikian, penelitian masa depan diharapkan dapat menjelaskan hambatan penerapan RAS dalam rantai pasok pangan.

2. Ketersediaan Data

Untuk memberikan manfaat yang nyata, setiap mitra dalam rantai pasok pangan perlu memiliki aplikasi RAS untuk diterapkan. Mitra ini akan menghasilkan sejumlah besar informasi, yaitu *big data*. *Big data* ini memberikan peluang untuk mengakses, menganalisis, dan membuat keputusan yang lebih baik di setiap tahap rantai pasok atau untuk keseluruhan rantai pasok, misalnya banyak petani padi

di Taiwan mengandalkan kalender pertanian tradisional, tetapi perubahan iklim telah memengaruhi kalender itu secara signifikan. Dengan demikian, petani padi di Taiwan mampu memantau suhu, hujan, dan bahan kimia untuk mengoptimalkan siklus produksi beras dengan menggunakan seperangkat sensor (Hille, 2018). Ketika jumlah mitra, transaksi, dan faktor (misalnya lingkungan dan bahan kimia) meningkat, jumlah data menjadi lebih besar sehingga membutuhkan sumber daya tambahan (misalnya kapasitas penyimpanan data). Kondisi ini juga memberikan peluang untuk studi masa depan tentang aplikasi analitik *big data* dalam rantai pasok pangan.

3. Keamanan Cyber

Produsen pangan enggan untuk merangkul sistem RAS karena mereka menghasilkan sejumlah *big data* yang menimbulkan kekhawatiran tentang keamanan dan privasi data. Inovasi dalam industri pangan didorong oleh data. Analisis data tentang produk, proses produksi, atau pergerakan produk di sepanjang rantai pasok dapat memastikan keberlanjutan bisnis dan memberikan saran kepada pemangku kepentingan yang terlibat. Sayangnya, ketika data menjadi pendorong utama, kerentanannya menjadi ancaman kritis bagi industri. Kekhawatiran terbesar adalah adanya rahasia dagang atau resep industri yang mungkin bocor ke pesaing sehingga mengakibatkan hilangnya bisnis atau pangsa pasar. Alasan penting lainnya adalah ketika data menjadi transparan, ada ancaman terhadap margin keuntungan. Contohnya antara lain pengecer akan menekan produsen untuk menghasilkan produk pangan dengan biaya lebih rendah. Di samping itu, pada tahun 2019, serangan *ransomware* terhadap Norsk Hydro, sebuah perusahaan aluminium global, menelan biaya £ 45 juta dan menginfeksi 22.000 komputer di 170 situs berbeda di 40 negara berbeda (Tidy, 2019). Insiden tersebut dapat memengaruhi produsen pangan serta rantai pasok mereka. Peretas dapat dengan mudah menemukan jalan ke dalam sistem teknologi informasi perusahaan dan membuat perusahaan bertekuk lutut dengan mematikan perangkat

keras, mengubah rute logistik, dan membatalkan pesanan—dengan imbalan sejumlah besar uang.

Sebuah laporan yang diterbitkan oleh Ponemon Institute pada tahun 2011 menyatakan bahwa 50 perusahaan yang berbasis di AS yang terkena serangan *malware* mewakili 40% dari keseluruhan kerugian mereka (Ponemon Institute, 2011). Para peneliti di Georgia Institute of Technology berhasil menunjukkan bahwa dengan menggunakan *ransomware*, mereka dapat memanipulasi sistem untuk membuang sejumlah besar klorin ke dalam air (Biggs, 2017). Untuk melindungi sistem dari pihak luar, Gázquez dkk. (2016) mengembangkan modem pita sempit UHF tujuan khusus untuk komunikasi antara konsol ke kendaraan. Ada semakin banyak upaya untuk mengatasi masalah keamanan dan privasi. Namun, ini tetap menjadi salah satu tantangan utama. Penelitian di masa depan dapat menyelidiki bagaimana membangun kepercayaan di antara mitra rantai pasok, yang juga dapat mempercepat adopsi RAS. Alternatifnya, banyak *start up* atau usaha kecil menengah yang memperhatikan pengembangan RAS di industri pangan. Perusahaan-perusahaan ini sebagian besar bersifat lokal dan memiliki pengetahuan yang kuat tentang industri pangan di lokasi geografis mereka. Oleh karena itu, sangat bermanfaat untuk mengeksplorasi solusi RAS yang dapat membantu perusahaan tersebut karena mereka perlu didorong untuk terbuka, fleksibel, dan cepat untuk mengimplementasikan solusi ini.

4. Keterampilan

Industri pangan dicirikan sebagai industri padat karya dan biasanya menghadapi kekurangan tenaga kerja musiman. Permintaan tenaga kerja paling tinggi pada saat persiapan lahan, penanaman, dan pemanenan. Karena sebagian besar industri ini sangat bergantung pada tenaga kerja migran, setiap perubahan kebijakan menyebabkan dampak yang signifikan terhadap ketersediaan tenaga kerja. Misalnya, lowongan pabrik pangan di Inggris menjadi semakin sulit untuk diisi karena banyak pekerja Uni Eropa meninggalkan negara itu karena penurunan nilai pound sterling, ketidakpastian seputar kebebasan

bergerak, dan status masa depan mereka sejak referendum Brexit. Selain itu, rencana pemerintahan Trump untuk meningkatkan deportasi dan tembok di perbatasan Amerika Serikat-Meksiko akan berdampak besar pada pertanian Amerika (Martin, 2017). Baru-baru ini, pandemi Covid-19 semakin mengekspos kekritisan produsen pangan. Semakin sulit untuk merekrut pekerja musiman karena pembatasan perjalanan di seluruh dunia dan berkurangnya ketersediaan layanan transportasi umum. Banyak pabrik harus tutup atau berjalan dengan kecepatan lebih lambat karena mengelola aturan jarak dua meter akan menjadi tantangan. Selain peristiwa-peristiwa tersebut, laju urbanisasi yang terus meningkat dan pergeseran tempat tinggal penduduk dari pedesaan ke perkotaan adalah faktor kritis lainnya. Proyeksi PBB menunjukkan bahwa populasi dunia yang tinggal di daerah perkotaan dapat meningkat menjadi 68% pada tahun 2050 (PBB, 2018). Selanjutnya, populasi pedesaan akan menurun dan memperburuk masalah kekurangan tenaga kerja di industri pangan.

Masalah kekurangan tenaga kerja ini memotivasi perusahaan untuk mengadopsi RAS ke dalam bisnis mereka. Di sisi lain, ada ketakutan di antara pekerja pabrik dan pemerintah bahwa RAS akan mengambil sebagian besar pekerjaan, serta kurangnya keterampilan di pasar untuk memenuhi kebutuhan RAS. Untuk menguraikan beberapa tren kunci bagi tenaga kerja pertanian, Rotz dkk. (2019) melakukan tinjauan literatur diikuti dengan wawancara dari para akademisi dan petani di Kanada. Para penulis menemukan bahwa tingkat pendidikan dan keterampilan yang rendah saat ini membuat petani enggan mengadopsi teknologi baru. Sementara itu, sejumlah besar petani bersedia mengubah strategi pekerjaan dengan mempekerjakan lebih banyak tenaga kerja berketerampilan tinggi. Namun, petani juga prihatin dengan kebijakan dan program pemerintah untuk meningkatkan keterampilan tenaga kerja. Solusi yang mungkin adalah diadakan kerja sama antara lembaga pendidikan dan organisasi komersial. Kerja sama ini dapat menjadi kompleks karena lembaga memiliki tujuan yang berbeda seperti penyebaran pengetahuan, sementara perusahaan tertarik untuk memiliki Hak Kekayaan Intelektual.

5. Biaya

Sistem RAS menawarkan solusi untuk meningkatkan efisiensi dalam rantai pasok pangan, tetapi solusi bisa menjadi mahal. Tingginya biaya sistem ini merupakan kendala untuk adopsi. Sebagian besar aplikasi RAS didasarkan pada penggunaan sensor. Meskipun demikian, harga sensor telah menurun baru-baru ini. Secara umum, sensor murah ini memberikan pengukuran sederhana. Sensor tersebut mengurangi pengulangan dan akurasi, sehingga memerlukan kalibrasi yang sesuai untuk meningkatkan efisiensi. Gazquez dkk. (2016) mengusulkan penggunaan sistem teleskop murah untuk kendaraan pertanian. Pembangunan tersebut dapat ditingkatkan untuk memberi manfaat bagi masyarakat luas. Perlu dicatat bahwa tujuan sistem RAS bukan untuk melebihi biaya akhir produk pangan, melainkan untuk menjaga biaya sistem ini serendah mungkin sehingga tidak meningkatkan biaya bagi konsumen akhir yang mengarah pada perubahan perilaku konsumen.

D. Robot untuk Distribusi Pangan dan Kebutuhan selama Pandemi

Aspek penting dalam menanggapi keadaan darurat medis skala besar seperti pandemi adalah rantai pasok yang berfungsi dengan baik. Dalam waktu normal, rantai pasok perlu menyeimbangkan tuntutan aksesibilitas dan daya tanggap. Seperti yang ditunjukkan oleh penularan Covid-19, pandemi menyebabkan kekurangan barang dan persediaan. Kekurangan pada gilirannya memicu respons perilaku seperti penimbunan dan pencongelan harga. Kecenderungan seperti itu muncul di berbagai tingkatan dalam rantai pasok. Di tingkat global, negara-negara dapat membatasi ekspor pasokan penting seperti pangan dan obat-obatan untuk melayani populasi mereka sendiri, atau lebih buruk lagi, dapat mengancam untuk mempersenjatai rantai pasok yang mereka anggap monopoli. Di tingkat nasional, negara bagian bersaing dengan pemerintah federal dan saling memperebutkan pesanan. Kecenderungan ini terulang di tingkat negara bagian dan kota yang terlibat dalam perang penawaran untuk memperoleh sum-

ber daya yang diperebutkan seperti Alat Pelindung Diri (APD). Dalam setiap kasus ini, entitas yang lebih kuat dan yang melanggar aturan dapat menyudutkan bagian yang tidak proporsional dan mengalahkan yang lebih lemah. Hal ini dapat menciptakan kelangkaan di tengah-tengah masyarakat, menyebabkan kesulitan yang sebenarnya dapat dihindari, tetapi bisa berdampak pada hilangnya nyawa.

Asimetri serupa dalam menyudutkan sumber daya juga terjadi di tingkat rumah tangga individu. Misalnya, di mil terakhir (tujuan/titik akhir) dari rantai pasok pangan, prevalensi *food deserts* (gurun pangan) adalah fenomena yang terkenal. Sebuah pandemi memperbesar disparitas ini dalam akses ke kebutuhan pokok, garis kemiskinan, dan kesenjangan digital. Mereka yang memiliki kemampuan untuk membayar premi dan mereka yang memiliki pengetahuan digital dapat mencari dan mengalihkan barang-barang dalam jumlah terbatas ke depan pintu rumah mereka menggunakan saluran *online*.

Akibatnya bagi mereka yang tidak mampu adalah mengunjungi toko-toko untuk membeli pangan dan kebutuhan pokok. Hal ini meningkatkan risiko mereka untuk terpapar virus karena toko-toko kemungkinan besar merupakan titik rawan penularan selama pandemi. Mayoritas warga AS misalnya, mendatangi toko kelontong besar sebagai tujuan utama mereka untuk mendapatkan pangan.

Studi perilaku pembelian pangan rumah tangga AS mengungkapkan bahwa hampir semua rumah tangga memperoleh pangan setidaknya sekali selama seminggu: 87% mengunjungi toko kelontong besar dan supermarket dan 85% mengunjungi restoran dan tempat makan lainnya setidaknya sekali (Todd & Scharadin, 2016). Pembatasan karantina selama pandemi Covid-19 mengakibatkan perolehan pangan dari makanan siap saji berkurang secara signifikan, menggeser permintaan ke toko kelontong. Hal ini mendorong pemerintah untuk mengklasifikasikan sembako sebagai layanan penting dan mendeklarasikan pedoman baru yang memungkinkan pekerja kelontong untuk terus bekerja bahkan setelah terpapar Covid-19, selama mereka tetap tanpa gejala. Kebijakan semacam itu kemungkinan akan semakin meningkatkan risiko paparan selama

kunjungan toko kelontong. Risiko paparan virus ini tetap tinggi terutama di jarak tempuh terakhir dalam rantai pasok pangan.

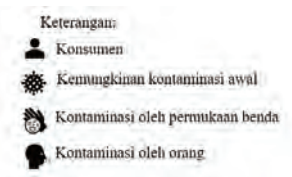
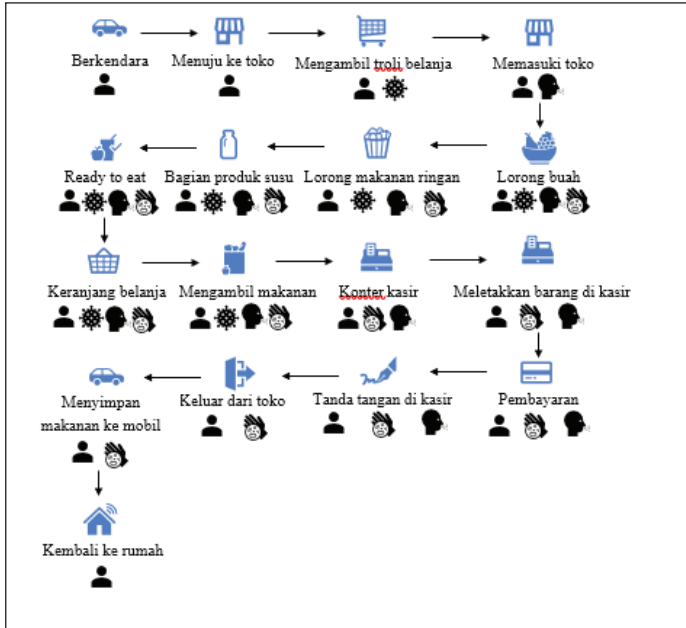
1. Model Mil Terakhir

a. Perbelanjaan di Toko

Belanja di toko kelontong besar adalah cara utama perolehan pangan bagi sebagian besar rumah tangga. Gambar 11.1 menjelaskan alur proses pelanggan berbelanja di toko kelontong. Dalam alur proses ini, titik-titik kontaminasi potensial telah dikategorikan ke dalam kemungkinan kontaminasi awal, kontaminasi oleh orang, atau kontaminasi melalui kontak dengan permukaan benda. Dalam bagian ini juga diklasifikasikan setiap tahap ke dalam langkah yang dilakukan oleh konsumen, pekerja toko kelontong, atau oleh mesin otonom seperti robot.

b. Pikap Tepi Jalan

Pikap tepi jalan semakin populer di kalangan konsumen. Dalam model ini, pesanan ditempatkan secara *online* dan penerima pesanan di dalam toko mengambil barang untuk konsumen. Untuk pengambilan, konsumen menunggu dalam kendaraan di luar toko dan pekerja toko membawa pesanan ke tepi jalan untuk mengantarkannya. Hal ini memungkinkan pelanggan untuk menghindari memasuki toko dan terkena virus. Pandangan konseptual penjemputan di tepi jalan diilustrasikan pada Gambar 11.2. Sementara pengambilan di tepi jalan mengurangi kemungkinan paparan secara substansial bagi konsumen, namun di sisi lain mempekerjakan penerima pesanan bisa menambah biaya operasional toko. Diperkirakan bahwa untuk memilih pesanan sebesar US\$ 100, dibutuhkan sekitar satu jam yang mungkin membebani toko dengan tambahan US\$ 20 (MWPVL International, 2020). Toko dapat membebaskan biaya ini kepada pelanggan dalam bentuk biaya tambahan, harga premium, dan ongkos kirim. Tips selanjutnya dapat meningkatkan biaya akhir dari kantong konsumen. Diagram alur proses order pikap sisi trotoar disajikan pada Gambar 11.3.



Sumber: Sharma dkk. (2020)

Gambar 11.1 Alur Proses Berbelanja Bahan Pangan

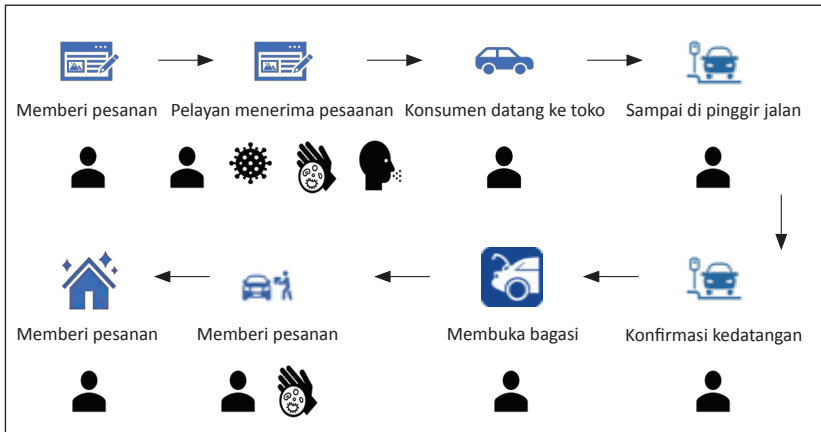
c. Pengiriman ke Rumah

Penjualan bahan pangan melalui platform *online* menjadi bagian yang sangat kecil dari keseluruhan pasar ritel bahan pangan. Meskipun masih sangat kecil, penjualan pangan melalui platform *online* adalah segmen yang tumbuh paling cepat (Skewis dan Lumelsky, 1994). Beberapa perusahaan di AS telah mencoba mendapatkan tempat di pasar grosir *online* termasuk AmazonFresh, FreshDirect, NetGrocer








Sumber: Cano (2020)

Gambar 11.2 Pikap Tepi Jalan



Keterangan:

-  Konsumen
-  Pelayan
-  Kemungkinan kontaminasi awal
-  Kemungkinan oleh permukaan benda
-  Kontaminasi oleh orang

Sumber: Sharma dkk. (2020)

Gambar 11.3 Alur Proses Pemesanan dan Pengiriman Tepi Jalan

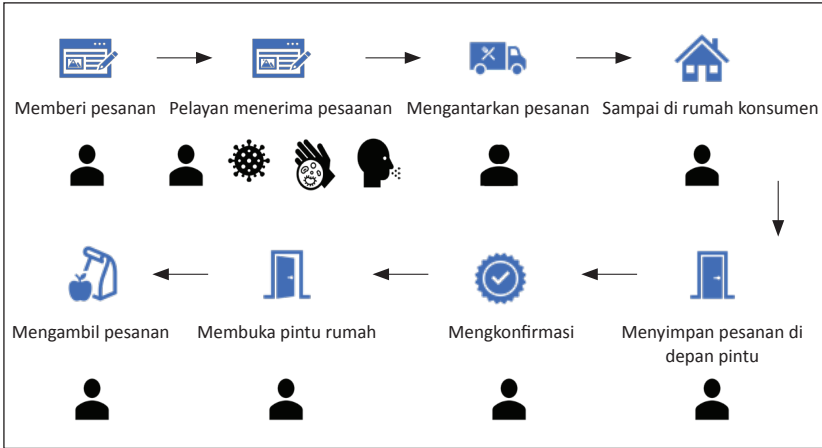
dan Safeway. Perusahaan pengiriman pihak ketiga seperti Instacart dan Shipt membantu menjadikan pengiriman ke rumah sebagai saluran penting. Pandemi Covid-19 semakin mempercepat peralihan ke belanja *online*. Misalnya, penjualan *online* meningkat sebesar 275% di bulan April 2020. Gambar 11.4 menyajikan alur kegiatan dalam pemenuhan pesanan pengiriman ke rumah. Pengiriman rumah menghindari kunjungan ke toko, tetapi menyebabkan biaya tambahan seperti biaya pengiriman, harga premium, serta tip. Hal ini mungkin menghalangi populasi yang menghadapi tantangan ketahanan pangan terburuk.

2. Tantangan Pengiriman Mil Terakhir






Covid-19 telah terbukti tetap hidup dan menular selama berjam-jam di udara dan berhari-hari di permukaan. Dilihat dari sudut ini, Gambar 11.1, 11.3, dan 11.4 dengan jelas menyoroti peran paket sebagai pembawa penyakit yang potensial. Penularan dapat lebih diperkuat karena sifat pekerjaan toko kelontong mengharuskan karyawan untuk bekerja dalam jarak dekat. Selain itu, bukti menunjukkan bahwa pelanggan di toko kelontong tidak mungkin mematuhi aturan jarak sosial. Sebuah survei terhadap lebih dari 5.000 pekerja toko kelontong dan pangan menemukan bahwa lebih dari 85% konsumen tidak mempraktikkan jarak sosial (Skewis dan Lumelsky, 1994). Oleh karena itu, langkah-langkah untuk mengurangi risiko infeksi, termasuk membersihkan dan mendisinfeksi pangan, serta pedoman jarak sosial kemungkinan gagal.

Selama pemenuhan jarak terakhir melibatkan tenaga manusia dan orang-orang saling berdekatan, toko kelontong tetap dapat menjadi vektor penularan penyakit. Hal ini dapat tecermin dalam meningkatnya insiden kematian pekerja toko kelontong setelah Covid-19.

Karena sembako tetap menjadi sumber pangan utama, Centers for Disease Control and Prevention (CDC) mengeluarkan ketentuan sementara untuk mengizinkan karyawan tetap bekerja meski telah



Keterangan:

-  Konsumen
-  Pelayan
-  Kemungkinan kontaminasi awal
-  Kemungkinan oleh permukaan benda
-  Kontaminasi oleh orang

Sumber: Sharma dkk. (2020)

Gambar 11.4 Alur Proses Pengiriman Pesanan ke Rumah

terpapar Covid-19 selama mereka tetap tanpa gejala. Dengan meningkatnya kematian pekerja grosir, serikat pekerja telah memprotes pedoman kebijakan tersebut dan ada keengganan untuk bekerja (Washington Post, 2020) sehingga menciptakan kekurangan pekerja. Kekurangan tenaga kerja, selain menimbulkan waktu tunggu yang lama untuk pemenuhan, juga meningkatkan biaya tenaga kerja, misalnya penerima pesanan untuk pesanan *online* dan tepi jalan dapat mencapai 63% dari biaya operasional untuk toko (MWPVL International, 2020). Setiap pesanan, ujung ke ujung, mungkin membutuhkan waktu sekitar satu jam kerja untuk mengambil, mengonsolidasikan,

menata, dan mempersiapkan pengiriman. Ini dapat dengan mudah menambahkan tambahan US\$ 20 ke biaya pesanan. Dengan adanya tantangan-tantangan ini selama pandemi, menjadi sangat penting untuk memiliki model pemenuhan mil terakhir yang tidak bergantung pada kunjungan konsumen di dalam toko atau karyawan.

E. Aturan Hukum untuk Robot Pengiriman Mil Terakhir

Dalam beberapa tahun terakhir, banyak inisiatif menuju manufaktur cerdas telah membangun dan mendapatkan kembali pangsa industri yang signifikan dalam perekonomian. Konsep yang menjanjikan adalah perpaduan antara dunia virtual dan dunia manufaktur nyata untuk mewujudkan konsep manufaktur cerdas dan logistik. Konsep ini menggunakan *cyber-physical systems* (CPS) dan jaringan produksi dinamis untuk mencapai rantai nilai yang fleksibel dan terbuka dalam pembuatan produk kustomisasi secara massal. Konsep produksi dan logistik pintar Jerman, Industri 4.0, bahkan melampaui tujuan ini karena Industri 4.0 juga bertujuan untuk mencakup efisiensi energi dan sumber daya, peningkatan produktivitas, dan siklus waktu-ke-pasar. Komunikasi dan interaksi *machine-to-machine* (M2M) yang terhubung berbasis internet membuka jalan bagi proses produksi dan logistik lintas perusahaan yang memungkinkan desain dan kontrol seluruh rantai pasok suatu produk selama masa pakainya, yaitu, dari desain produk hingga logistik, distribusi, dan layanan pascaproduksi. Akibatnya, Industri 4.0 mengarah pada paradigma rantai pasok baru pada jaringan manufaktur yang kompleks dan saling terkait dengan tingkat fragmentasi yang tinggi dan hambatan masuk yang rendah untuk usaha kecil dan menengah (UKM) serta strategi R&D baru, rantai nilai lintas nasional, dan model bisnis baru.

Terlepas dari pentingnya logistik dan distribusi untuk konsep Industri 4.0, tinjauan literatur singkat mengungkapkan bahwa masalah mil terakhir belum dibahas oleh para akademisi dalam konteks Industri 4.0 sejauh ini. Namun, masalah mil terakhir telah menjadi

subjek sejumlah besar akademisi dalam konteks ritel dan *e-commerce*. Lee dan Whang (2001) menunjukkan strategi pemenuhan inovatif untuk pesanan dan berkontribusi dalam memecahkan masalah mil terakhir. Song dkk. (2009) membahas masalah mil terakhir dari sudut pandang transportasi, sedangkan Boyer dkk., (2009) melakukan penelitian dengan memanfaatkan simulasi berdasarkan perangkat lunak perutean kendaraan, yaitu menyelidiki hubungan antara kepadatan konsumen, panjang pengiriman, dan efisiensi pengiriman.

Subbab ini akan fokus pada robot pengiriman paket swakemudi yang digunakan untuk transportasi rantai pasok di jaringan Industri 4.0 serta untuk pengiriman ke konsumen pada jarak tempuh terakhir. Hal ini berkonsentrasi pada kerangka peraturan untuk robot pengiriman otonom tersebut. Bagian ini juga menyoroti status robot pengiriman otonom saat ini untuk distribusi dan menyelidiki kerangka peraturan terkait untuk penggunaan kendaraan swakemudi ini.

Volume pasar *e-commerce* yang masih berkembang menimbulkan pertanyaan tentang pengiriman produk yang efisien kepada konsumen. Pengiriman mil terakhir mencakup tiga pemangku kepentingan, yaitu penjual, perantara, dan konsumen. Punakivi dkk. (2001) mengusulkan penerimaan barang tanpa pengawasan yang dapat mengurangi biaya pengiriman ke rumah hingga 60%. Pendekatan pengiriman tanpa pengawasan didasarkan pada dua konsep utama, yaitu konsep kotak penerima dan konsep kotak pengiriman. Pada konsep kotak penerima, kotak penerima dipasang di garasi atau halaman rumah konsumen, sedangkan konsep kotak pengiriman adalah kotak aman berinsulasi yang dilengkapi dengan mekanisme dok. Berdasarkan hasil simulasi, solusi pengiriman ke rumah yang memungkinkan penerimaan tanpa pengawasan yang aman secara operasional merupakan model yang paling hemat biaya untuk distribusi mil terakhir. Mereka juga menegaskan bahwa solusi kotak pengiriman yang aman berpotensi memungkinkan tingkat pertumbuhan yang lebih cepat dan fleksibilitas investasi yang lebih tinggi karena diperlukan investasi yang lebih kecil per konsumen.

1. Robot Pengiriman

Setelah *hype* awal tentang pengiriman dengan *drone*, belakangan ini robot pengiriman berbasis darat menjadi fokus untuk jarak tempuh terakhir/*last mile*. Karena robot ini harus berbagi tempat dengan alat transportasi lain atau pejalan kaki, area operasi pilihan mereka adalah pinggiran kota dan area di mana lalu lintasnya relatif rendah. Di area ini, robot pengiriman otonom memiliki keunggulan kompetitif jika dibandingkan dengan mode pengiriman lainnya. Model bisnis yang mendasarinya menekankan keunggulan biaya untuk pengiriman jarak jauh, yang diperkirakan kurang dari US\$ 1 per unit/pengiriman dan tergantung pada tingkat gaji di lokasi masing-masing—hingga 15 kali lebih kecil dari biaya saat ini (International Data Corporation, 2017).

Saat ini, pemain kunci dari pengiriman jarak jauh tidak hanya terdiri dari perusahaan pengiriman yang sudah mapan, termasuk penyedia layanan logistik tradisional seperti DHL, UPS, dan lainnya, tetapi juga berbagai perusahaan rintisan baru yang berfokus pada pengembangan robot pengiriman yang tumbuh di seluruh dunia. Area bisnis paling penting dari robot pengiriman saat ini adalah barang yang mudah rusak seperti pangan dan bunga, tetapi juga aplikasi di sektor ritel dan pergudangan dimungkinkan dalam konteks gudang otomatis. Pandangan lebih dekat ke lanskap pendanaan *start-up* mengungkapkan bahwa sekitar 50% dari semua jumlah investasi didedikasikan untuk robot perusahaan yang terdiri dari otomatisasi industri untuk manufaktur serta robot pengiriman (CBINSIGHTS, 2017). Menurut sebuah studi dari International Data Corporation, sektor manufaktur akan terus menjadi pembeli terbesar robot dan layanan terkait, serta pengeluaran robotika di seluruh dunia yang mencapai level US\$100 miliar pada tahun 2017 diperkirakan akan meningkat lebih dari dua kali lipat hingga 2021 (International Data Corporation, 2017). Namun, sektor robot saat ini menyadari bahwa pengiriman ke sektor konsumen diperkirakan akan mewakili pertumbuhan besar hingga tahun 2021, dengan tingkat pertumbuhan tahunan gabungan sekitar 60%. Wawasan lebih dalam tentang robot pengiriman berbasis darat menunjukkan bahwa perusahaan rintisan seperti Marble, Teleretail,

Dispatch, atau Starship Technologies mampu menarik dana dalam kisaran beberapa juta euro (Basu dkk., 2020).

Diskusi mengenai kerangka regulasi untuk robot pengiriman masih terbuka. Di satu sisi, dimungkinkan untuk membangun langkah-langkah menuju kerangka peraturan untuk Industri 4.0. Di sisi lain, dimungkinkan juga untuk mengikuti pembahasan yang sedang berlangsung dalam konteks mobilitas otonom. Maurer dkk. (2015) mengerjakan kerangka peraturan mengemudi otonom dan menganalisis dimensi mobilitas politik, hukum, sosial, dan keberlanjutan. Investigasi mereka menyoroti daya saing, inovasi, keamanan, harmonisasi, dan koordinasi. Penelitian mereka didasarkan pada hasil empiris dari pembangunan di beberapa negara serta pada konvensi Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) tentang lalu lintas jalan. Basu dkk., (2020) baru-baru ini meneliti kerangka hukum untuk robot pertanian otonom, tetapi karena “agribot” beroperasi biasanya hanya di lahan pribadi, dimensi hukum lalu lintas yang belum terselesaikan belum tercakup oleh studi mereka. Subbab ini membahas jalur kerangka regulasi Industri 4.0 dengan memahami robot pengiriman sebagai bagian dari lingkungan Industri 4.0. Akibatnya, pembahasan berkonsentrasi pada masalah kewajiban, perlindungan data, privasi, dan perkembangan hukum seputar robot pengiriman.

2. Studi Kasus

a. Starship Technologies LTD

Starship Technologies Ltd. didirikan pada tahun 2014 oleh salah satu pendiri Skype, Janus Friis dan Ahti Heinla, di Tallinn dengan tujuan untuk mengatasi masalah jarak jauh dengan mengembangkan robot pengiriman otonom. Saat ini, Starship Technologies adalah perusahaan rintisan teknologi Eropa dengan anak perusahaan di Estonia, Inggris, dan AS yang telah membangun robot pengiriman otonom pertama yang tersedia secara komersial untuk merevolusi industri pengiriman lokal. Starship juga mengklaim ramah lingkungan, karena robot Starship tidak memancarkan CO₂ (sementara—tentu saja—

pembangkit tenaga listrik melakukannya). Starship juga mengklaim bahwa robot mereka berkontribusi untuk mengurangi kemacetan. Selain itu, Starship memberikan solusi bagi pengecer dan perusahaan logistik untuk meningkatkan efisiensi rantai pasok dan mengurangi biaya.

Kendaraan swakemudi kecil Starship dengan berat kurang dari 20 kg, bertenaga listrik, dan dirancang untuk mengemudi di trotoar dengan kecepatan maksimal 6 km/jam mampu mengirimkan barang secara lokal dalam waktu 15–30 menit dan dalam radius hingga 5 km dengan harga di bawah € 1 per pengiriman. Robot dapat mengirimkan barang hingga 10 kg dengan harga pengiriman yang hingga 15 kali lebih rendah dari harga normal untuk pengiriman jarak jauh di ekonomi tingkat gaji tinggi, yang membuat robot pengiriman menarik untuk aplikasi *e-commerce* untuk pengiriman pangan atau layanan pos. Dalam praktiknya, robot pengiriman Starship telah diuji oleh penyedia layanan pemesanan pangan online di Tallinn (Volt), serta oleh layanan pengiriman pizza Domino untuk menggunakannya sebagai “perangkat pengiriman pribadi”.

Untuk menjaga sirkulasi yang aman, robot dilengkapi dengan beberapa sensor dan sistem pelacakan yang terdiri dari sembilan kamera, GPS, dan unit pengukuran inersia/*Inertial Measurement Unit* (IMU) untuk orientasi khusus. Mereka juga dilengkapi dengan mikrofon dan speaker yang memungkinkan mereka untuk berkomunikasi dengan manusia. Bahkan jika robot disebut kendaraan otonom, mereka, saat ini, hanya mengemudi sendiri sekitar 90%, sisanya—terutama penyeberangan jalan yang rumit dan meter terakhir ke penerima—akan dikendalikan dari jarak jauh dari pusat kendali yang terhubung melalui Wi-Fi dan jaringan telekomunikasi. Selama perjalanan mereka, robot terus diawasi oleh orang yang bertanggung jawab, yaitu kontak dengan pusat kendali yang tidak hanya terjadi jika operasi otonom robot gagal. Kontrol jarak jauh ini berarti bahwa pengoperasian robot pengirim menyiratkan pertukaran data permanen, termasuk transfer *live* video, antara robot dan pusat kendali melalui jaringan telekomunikasi publik.

Strategi manajemen biaya di Starship Technologies berfokus pada penggunaan rekayasa perangkat keras tradisional untuk memastikan bahwa robot tersebut murah untuk diproduksi dan hanya memerlukan perawatan dasar. Dalam hal manajemen biaya operasional, perusahaan mencoba menghasilkan keunggulan biaya dengan menargetkan robot otonom hibrida yang dapat dioperasikan dalam waktu dekat, yang mampu mengemudi sepenuhnya secara otonom hampir sepanjang waktu. Dalam versi yang dikembangkan sepenuhnya ini, pengawas kendali jarak jauh di pusat kendali hanya perlu terlibat dalam operasi jarak jauh melalui video dalam persentase waktu yang kecil, yang meminimalkan biaya operasional robot.

Sementara itu, untuk menciptakan solusi cerdas dalam menjembatani jarak pengiriman yang lebih jauh, perusahaan mulai bekerja sama dengan Daimler untuk mengembangkan “RoboVan”, yang membentuk hub robot seluler di dasar Sprinter Minibus dan akan sangat memperluas jangkauan dari robot. Pendekatan pengiriman ini mewujudkan konsep “*hub and spoke*”²⁰, yang merupakan model standar yang terkenal dalam logistik. RoboVan-Mercedes-Benz Sprinter untuk tujuan itu dilengkapi dengan sistem penyimpanan berkapasitas 54 kotak pengiriman dan delapan robot Starship. Sprinter melakukan elemen transportasi jarak jauh sebagai hub seluler dan membawa robot bersama dengan kotak pengiriman langsung ke suatu area di mana banyak pengiriman individu harus dilakukan. Dari tempat ini, robot turun dari RoboVan secara mandiri dan menempuh jarak terakhir ke konsumen untuk mengirimkan barang secara individual ke konsumen dan kembali ke Sprinter sesudahnya. Pendekatan ini mewujudkan konsep “*hub and spoke*” dengan pengiriman robot untuk jarak pendek terakhir.

²⁰ Paradigma distribusi *hub dan spoke* adalah bentuk optimasi transportasi di mana perencana lalu lintas mengatur rute sebagai serangkaian “jari-jari” yang menghubungkan titik-titik terluar ke pusat. Bentuk sederhana dari model distribusi/koneksi ini dibandingkan sistem transit *point-to-point*, di mana setiap titik memiliki rute langsung ke setiap titik lainnya, dan yang memodelkan metode utama pengangkutan penumpang dan barang hingga tahun 1970-an.

Starship Technologies menganggap robot pengirimannya sebagai bentuk pengiriman tambahan bukan sebagai pengganti, yaitu model logistik yang dapat digunakan dengan robot berbeda dari model metode pengiriman tradisional. Ahti Heinla, salah satu pendiri Starship Technologies, mengilustrasikan dalam sebuah wawancara berbagai bidang pelengkap pengiriman dengan kurir sepeda yang beroperasi di lingkungan perkotaan yang sangat padat, karena mereka mampu mengatasi kemacetan lalu lintas, sedangkan kendaraan otonom sudah ditakdirkan untuk pengiriman di pinggiran kota dengan lalu lintas rendah. Akses ke kotak penyimpanan barang di robot diatur oleh aplikasi *smartphone*, yang memungkinkan konsumen membuka kunci penutup robot dan mengambil barang. Jika seseorang mencoba mencuri robot, kamera akan mengambil foto si pencuri, dan alarm akan berbunyi. Selain itu, beberapa perangkat pelacak dapat melacak lokasi robot melalui GPS dan operator jarak jauh dapat berbicara melalui speaker dua arah dengan pencuri. Selain itu, robot dengan jelas akan berhenti bekerja dan tidak akan membuka unit kargo kecuali diprogram ulang oleh Starship.

Pada Januari 2017, Starship Technologies mengumumkan pendanaan awal sebesar US\$17,2 juta untuk membangun robot otonom yang dirancang untuk mengirimkan barang secara lokal. Putaran pendanaan dipimpin oleh Daimler AG dan memasukkan beberapa dana modal ventura lainnya, di antaranya adalah Shasta Ventures, Matrix Partners, ZX Ventures, Morpheus Ventures, Grishin Robotics, dan Playfair Capital. Jumlah pendanaan awal ini menjadikan Starship Technologies mendapat peringkat teratas di antara perusahaan robot pengiriman terkemuka di dunia untuk jarak tempuh terakhir.

3. Tantangan Hukum

Terlepas dari kenyataan bahwa robot pengiriman disebut otonom, mereka—untuk saat ini—hanya secara sebagian mampu mengemudi sendiri, yaitu masih dikendalikan dari jarak jauh dari pusat kendali. Kendali jarak jauh ini dipertahankan melalui pertukaran data permanen antara robot dan pusat kendali, yang mengakibatkan

masalah serius dalam hal perlindungan data. Akan tetapi, pada awalnya fakta bahwa pengiriman menggunakan area lalu lintas umum yang diperuntukkan bagi pejalan kaki harus dianalisis dari perspektif hukum—terutama dalam hal tanggung jawab wanprestasi atas kecelakaan berpotensi terjadi.

a. Tanggung Jawab atas Kerugian akibat Kecelakaan Lalu Lintas

Hukum terhadap perbuatan melawan hukum (tort) di sebagian besar sistem hukum memberikan klaim umum untuk kerusakan yang disebabkan oleh tindakan yang merugikan, yaitu kesalahan perdata yang mengakibatkan kerugian atau kerusakan pada orang lain. Berdasarkan prinsip-prinsip ini, apabila diterapkan ke dalam hukum positif pada semua sistem hukum nasional maka orang yang mengemudikan robot pengiriman bertanggung jawab juga atas pengawasannya (dalam studi kasus Starship Technologies). Orang yang mengoperasikan akan bertanggung jawab atas tindakan merugikan apa pun melalui alatnya—di sini robot pengirim—itu sendiri.

Secara umum, tanggung jawab yang merugikan dalam banyak sistem hukum didasarkan pada kesalahan (lihat misalnya, bagian 823 I Bürgerliches Gesetzbuch, yaitu KUH Perdata Jerman, selanjutnya BGB) atau tunduk pada pengecualian jika kesalahan tersebut tidak dilakukan secara langsung oleh pelaku kesalahan tersebut, tetapi orang ketiga. Dalam studi kasus, hal ini bisa terjadi pada karyawan Starship yang bekerja di pusat kendali. Berbeda dengan itu, dua konstelasi umumnya ditandai oleh tanggung jawab yang ketat (tidak berbasis kesalahan) atas kerusakan—kewajiban produk dan kewajiban menu-rut undang-undang lalu lintas.

1) Tanggung Jawab Produk

Dalam konteks robot pengiriman, penting dicatat bahwa produsen produk yang menyebabkan kerusakan/cedera dapat dimintai pertanggungjawaban atas kesalahan atau kelalaian di sebagian besar sistem hukum Barat. Di ruang hukum Uni Eropa (UE) terdapat

Directive 85/374/EEC (*Product Liability Directive*) yang mengatur tanggung jawab atas produk yang cacat dan telah diterapkan masing-masing di semua sistem hukum nasional negara anggota UE. Arahan tersebut mendefinisikan bahwa “produk” sebagai semua barang bergerak—bahkan jika digabungkan ke dalam barang bergerak atau tidak bergerak lainnya yang dianggap secara desain sebagai produk yang telah selesai dan memberikan tanggung jawab yang tegas atas segala kerusakan yang disebabkan oleh produk cacat pada produsen, “cacat” adalah produk apa pun yang “tidak memberikan keamanan yang diharapkan oleh seseorang, dengan mempertimbangkan semua keadaan termasuk penyajian produk, seperti kecukupan peringatan, dalam penggunaan yang wajar di mana produk itu akan ditempatkan, dan waktu ketika produk itu diedarkan adalah faktor-faktornya” (pasal 6), yang membuat standar menjadi objektif.

Oleh karena itu, tanggung jawab produk dapat timbul dari cacat konstruksi, cacat fabrikasi, cacat dalam instruksi penggunaan, dan cacat pengawasan produk—artinya semua bidang di bawah kendali penuh produsen—produksi yang baik dan spesifikasi produk, instruksi penggunaan, dan pengawasan oleh produsen dapat membatasi risiko tanggung jawab sebagai produsen.

2) **Tanggung Jawab Kerugian di Bawah Undang-Undang Lalu Lintas**

Undang-undang lalu lintas memiliki kasus yang jauh lebih sedikit, yang di sebagian besar sistem hukum memperluas tanggung jawab sesuai dengan keadaan khusus dalam bidang lalu lintas umum. Dalam hal ini, undang-undang lalu lintas tidak hanya mencakup pemilik kendaraan yang dapat dimintai pertanggungjawaban, tetapi juga pengemudi secara terpisah dan secara umum membebaskan tanggung jawab yang ketat kepada pemilik kendaraan. Pemilik kendaraan akan bertanggung jawab atas segala kerusakan yang disebabkan oleh kendaraannya di lalu lintas umum, bahkan jika ia tidak bertindak dengan sengaja atau karena kelalaian.

Setiap korban kecelakaan yang melibatkan robot pengiriman akan mencoba menerapkan kewajiban hukum lalu lintas daripada kewajiban untuk ganti rugi standar, yang biasanya berbasis kesalahan. Pertanyaannya adalah apakah robot pengantar dapat dikualifikasikan sebagai kendaraan yang termasuk dalam lalu lintas umum dalam undang-undang lalu lintas.

Robot pengiriman dimulai dari definisi yang ada untuk kendaraan bermotor, yang (hanya) diizinkan beroperasi di area pejalan kaki (trotoar) karena kecepatan dan beratnya yang rendah. Kendaraan yang sebanding dengan robot pengiriman adalah kursi roda bermotor. Perbedaan antara kursi roda bermotor dan robot pengiriman ini identik dengan perbedaan antara mobil yang dikemudikan manusia dan mobil otomatis. Karena perbedaan kedua telah diatur dalam berbagai hukum, perbedaan tersebut dapat menjadi model untuk definisi setiap robot pengiriman juga.

Penggunaan kursi roda bermotor diatur oleh sebagian besar sistem hukum dan memberikan definisi masing-masing dalam undang-undang lalu lintas jalan dan/atau izin mengemudi mereka. StVO Jerman (Straßenverkehrsordnung/tindakan lalu lintas jalan), misalnya, telah memberikan definisi yang sangat rinci tentang kursi roda bermotor, dengan menyatakan dalam § 24 par 2 (alat transportasi khusus), bahwa “kursi roda bermotor atau dengan kursi roda selain yang disebut pada ayat 1 dapat digunakan di lalu lintas mana pun di mana pejalan kaki juga diizinkan, tetapi hanya dengan kecepatan berjalan kaki”.

Kursi roda bermotor itu sendiri, bagaimanapun, didefinisikan dalam Fahrerlaubnisverordnung (undang-undang izin mengemudi) di § 4 II 1 e, menjadi “kendaraan bertenaga listrik satu tempat duduk, yang dirancang untuk digunakan oleh penyandang cacat fisik, memiliki massa maksimum tidak lebih dari 300 kg termasuk baterai tetapi tanpa pengemudi, massa maksimum yang diizinkan (termasuk pengemudi) tidak melebihi 500 kg, kecepatan desain maksimum tidak lebih dari 15 km/jam dan lebar total 110 cm” (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2010).

Sementara itu, banyak dari kriteria ini dapat diterapkan pada robot pengantar seperti halnya pada kursi roda bermotor. Ada tiga kriteria definisi yang masing-masing harus diadaptasi, sebagai berikut.

- a) “Kendaraan bermotor yang digerakkan secara elektrik, baik otonom atau sebagian secara otonom (kriteria 1), yaitu
 - (1) dirancang untuk pengangkutan barang (kriteria 2), dan
 - (2) memiliki massa maksimum tidak lebih dari (misalnya, 10) kg termasuk baterai tanpa angkutan, massa maksimum yang diizinkan (termasuk angkutan) tidak melebihi (misalnya, 20) kg, kecepatan desain maksimum tidak lebih dari (misalnya, 6 km/jam) dan total tinggi/lebar/panjang/dari xyz (kriteria 3 = spesifikasi teknis).”

Istilah “kendaraan bermotor” sudah didefinisikan secara internasional dalam Pasal 1 hal Konvensi Lalu Lintas Jalan tahun 1958 (lebih lanjut: Konvensi 1958) (Economic Commission for Europe Inland Transport Committee, 1968), menjadi “kendaraan yang biasanya digunakan untuk membawa orang atau barang di jalan atau untuk menggambar di jalan”. Definisi mengenai perangkat kemudi otonom atau sebagian otonom memerlukan klarifikasi.

Kriteria penting yang memungkinkan kursi roda bermotor untuk beroperasi di lalu lintas umum (termasuk area pejalan kaki) adalah kesesuaiannya dengan prinsip umum “Setiap kendaraan yang bergerak atau gabungan kendaraan harus memiliki pengemudi”, sebagaimana dinyatakan dalam pasal 8 par 1 Konvensi 1958. Mereka juga mematuhi art. 8 par 5 “Setiap pengemudi harus selalu dapat mengendalikan kendaraannya atau membimbing hewannya”, dan pasal 13 par 1 “Setiap pengemudi kendaraan dalam segala keadaan harus mengendalikan kendaraannya sehingga dapat menjalankan kehati-hatian yang sepatutnya dengan tepat dan selalu dalam posisi untuk melakukan semua manuver yang diperlukan darinya”.

Karena semua kendaraan yang dikemudikan secara otonom—yaitu kendaraan yang tidak selalu diawasi oleh pengemudi—dengan demikian tidak dapat diterima menurut ketentuan Konvensi 1958,

Partai Kerja Keselamatan Lalu Lintas Jalan (WP.1), yang bertanggung jawab atas pengaturan masalah ini dalam Komisi Ekonomi Perserikatan Bangsa-Bangsa untuk Eropa, telah memutuskan dalam pertemuan ke-68 mereka (24–26 Maret 2014) untuk mengusulkan adaptasi Konvensi 1958 dengan kebutuhan lalu lintas otomatis dan melengkapi pasal 8 konvensi 1958 dengan tambahan paragraf 5b adalah, yang menyatakan bahwa:

“Sistem kendaraan yang memengaruhi cara kendaraan dikemudikan harus dianggap sesuai dengan ayat 5 Pasal ini dan dengan ayat 1 Pasal 13, bila sesuai dengan kondisi konstruksi, pemasangan dan penggunaan menurut instrumen hukum internasional mengenai kendaraan beroda, perlengkapan dan suku cadang yang dapat dipasang dan/atau digunakan pada kendaraan beroda. Sistem kendaraan yang memengaruhi cara kendaraan dikemudikan dan tidak sesuai dengan kondisi konstruksi, pemasangan dan penggunaan yang disebutkan di atas, harus dianggap sesuai dengan ayat 5 Pasal ini dan dengan ayat 1 Pasal 13, bila sistem tersebut dapat dikemudikan atau dimatikan oleh pengemudi.”

Jika robot pengiriman dimaksudkan untuk beroperasi di lalu lintas umum, mereka juga harus memenuhi kriteria ini. Dengan demikian, definisi kriteria 1 harus menerapkan definisi ini secara langsung. Berangkat dari latar belakang ini, robot pengiriman dapat didefinisikan sebagai berikut:

“Robot pengiriman adalah kendaraan bermotor yang digerakkan secara elektrik dan otonom yang dirancang untuk pengangkutan barang, dan memiliki massa maksimum tidak lebih dari (misalnya, 10) kg termasuk bit baterai tanpa muatan, massa maksimum yang diizinkan (termasuk angkutan) tidak melebihi (misalnya, 20) kg, kecepatan desain maksimum tidak lebih dari (misalnya, 6 km/jam) dan total tinggi/lebar/panjang/xyz. Suatu kendaraan bermotor dianggap dapat dioperasikan secara otonom atau sebagian

otonom, apabila sistem kemudinya sesuai dengan kondisi konstruksi, pemasangan dan penggunaan menurut instrumen hukum internasional mengenai kendaraan beroda, perlengkapan dan suku cadang yang dapat dipasang dan/atau digunakan pada kendaraan beroda. Sistem kendaraan yang memengaruhi cara kendaraan dikemudikan dan tidak sesuai dengan kondisi konstruksi, pemasangan dan penggunaan yang disebutkan di atas, akan dianggap sesuai dengan Pasal ini, bila sistem tersebut dapat diganti atau dimatikan oleh pengemudi.”

Saat ini, adaptasi tiap undang-undang lalu lintas nasional belum terjadi, tetapi berbagai negara akan menerapkan Partai Kerja PBB tentang Keselamatan Lalu Lintas Jalan dalam waktu dekat. Negara-negara tersebut juga akan mendefinisikan robot pengiriman dalam istilah yang sangat mirip (jika tidak identik), seperti yang diusulkan di atas, membuat robot pengiriman sebagai salah satu objek undang-undang lalu lintas umum. Meskipun menurut definisi robot pengiriman sampai saat ini tidak akan dimasukkan dalam undang-undang lalu lintas umum, hakim memiliki kebijaksanaan—asalkan undang-undang lalu lintas nasional yang berlaku masing-masing memberikan definisi kendaraan yang cukup luas—untuk memasukkan robot pengiriman ke dalam ruang lingkup tanggung jawab hukum lalu lintas umum saat ini.

Oleh karena itu, perusahaan transportasi atau penjual yang secara langsung mengirimkan barang mereka harus menyadari tanggung jawab yang ketat berdasarkan undang-undang lalu lintas umum yang berlaku pada robot pengiriman. Di samping itu, juga mengambil tindakan dengan menghubungi otoritas lalu lintas setempat dan meminta mereka untuk mengklarifikasi “status kewajiban” robot pengiriman di wilayah yurisdiksi tertentu. Dalam hal cakupan robot pengiriman oleh undang-undang lalu lintas masing-masing, mereka harus menyadari risiko tanggung jawab yang ketat. Apabila mereka ingin mengambil risiko atau mengambil tindakan persiapan, misalnya, mereka diminta mengasuransikan diri mereka sendiri untuk tanggung jawab ini.

3) Robot Pengiriman dan Perlindungan Data

Informasi yang dikumpulkan berdasarkan rancangan oleh sebagian besar robot pengiriman (robot Starship, misalnya, dilengkapi dengan enam kamera) untuk berbagai tujuan—dokumentasi kecelakaan, pembuatan peta lintasan pengiriman yang efisien, dan sejenisnya—memiliki nilai komersial yang cukup besar, bukan hanya untuk pengguna robot pengiriman, tetapi juga untuk otoritas pemerintah setempat, pesaing, atau produsen robot pengiriman yang berusaha meningkatkan pengembangan produk mereka. Dengan demikian, perlindungan data merupakan salah satu masalah hukum utama untuk robot pengiriman.

Pada tahun 2016, Komisi Eropa, Parlemen Eropa, dan Dewan Uni Eropa menyetujui Peraturan Perlindungan Data Umum yang mulai berlaku pada 25 Mei 2018 dan menggantikan Arahan Perlindungan Data tahun 1995. Peraturan Perlindungan Data Umum/*The General Data Protection Regulation* (GDPR) bertujuan untuk memperkuat dan menyatukan perlindungan data untuk semua individu di dalam Uni Eropa dan membahas ekspor data pribadi ke negara-negara di luar Uni Eropa. Salah satu sorotan penting dari GDPR adalah upayanya untuk “mengembalikan kendali” kepada warga dan penduduk atas data pribadi mereka, dan untuk menyelaraskan kerangka peraturan untuk bisnis internasional dengan menyatukan peraturan di dalam UE. Sebagai peraturan UE, GDPR berlaku langsung di semua negara anggota UE, yaitu tidak mengharuskan pemerintah nasional untuk meloloskan undang-undang yang memungkinkan.

Istilah utama GDPR adalah data pribadi yang dianggap “sensitif” dengan syarat bahwa data tersebut mengungkapkan asal ras atau etnis, pendapat politik, keyakinan agama atau filosofis, keanggotaan serikat pekerja, data genetik, data biometrik yang diproses sematamata untuk mengidentifikasi manusia, data terkait kesehatan, dan data tentang kehidupan seks atau orientasi seksual seseorang (Voigt, 2016). GDPR mendefinisikan ‘data pribadi’ sebagai informasi apa pun yang berkaitan dengan orang yang teridentifikasi atau dapat diiden-

tifikasi (subjek data). Orang yang dapat diidentifikasi adalah setiap orang yang dapat diidentifikasi secara langsung atau tidak langsung, khususnya yang mengacu pada pengidentifikasi, seperti nama, nomor identifikasi, data lokasi, pengidentifikasi *online*, atau satu atau lebih faktor yang spesifik untuk fisik, fisiologis, genetik, mental, ekonomi, budaya, atau identitas sosial dari orang tersebut. Selain itu, katalog contoh untuk “data pribadi” memberikan contoh informasi yang berkaitan dengan individu, baik yang berkaitan dengan kehidupan pribadi, profesional, atau publiknya, misalnya nama, alamat rumah, foto, alamat email, detail bank, postingan di situs web jejaring sosial, informasi medis, atau alamat IP komputer.

Data pribadi ini harus diproses secara adil, sah, dan transparan. Sementara itu, persetujuan subjek data adalah kriteria utama untuk keabsahan dan prinsip inti pemrosesan data secara umum. “Pengendali harus dapat menunjukkan bahwa subjek data telah menyetujui pemrosesan data pribadinya dan subjek data berhak untuk menarik persetujuannya setiap saat”, dan konten harus disediakan secara eksplisit, yaitu tidak disimpulkan dan hanya dengan perilaku tersirat.

Ketidakpatuhan terhadap aturan perlindungan data yang ketat dapat menyebabkan hukuman berat hingga 4% dari omzet global perusahaan atau € 20 Juta (Voigt, 2016). Berdasarkan GDPR, organisasi yang melanggar GDPR dapat didenda hingga 4% dari omzet global tahunan atau € 20 Juta. Nilai tersebut adalah denda maksimum yang dapat dikenakan untuk pelanggaran yang paling serius, misalnya tidak memiliki persetujuan konsumen yang memadai untuk memproses data atau melanggar inti dari konsep *Privacy by Design*. Ada pendekatan berjenjang untuk denda, misalnya perusahaan dapat didenda 2% karena tidak memiliki catatan mereka secara berurutan, tidak memberi tahu otoritas pengawas dan subjek data tentang pelanggaran, atau tidak melakukan penilaian dampak. Selain itu, individu juga dapat membawa tindakan perdata tambahan untuk tindakan yang diambil oleh otoritas pemerintah terhadap pelanggar.

GDPR membedakan antara “subjek data”, “pengontrol”, dan “pemroses”. Penduduk UE yang mewakili konsumen pengiriman

mengambil peran sebagai “subjek data”. Untuk memperjelas pengontrol data dan pemroses data dalam hal robot pengirim, perlu mengacu pada Pasal 4 GDPR yang mendefinisikan ‘pengontrol’ sebagai “orang perseorangan atau badan hukum, otoritas publik, lembaga atau badan lain yang sendiri atau bersama-sama dengan orang lain, menentukan tujuan dan cara pemrosesan data pribadi; di mana tujuan dan sarana pemrosesan tersebut ditentukan oleh undang-undang Persatuan atau Negara Anggota, pengontrol atau kriteria khusus untuk pencalonannya dapat diatur oleh undang-undang Persatuan atau Negara Anggota”. Sementara itu, ‘pemroses’ berarti “orang perseorangan atau badan hukum, otoritas publik, lembaga atau badan lain yang memproses data pribadi atas nama pengontrol”.

Dengan menerapkan Pasal 4 pada kasus robot pengantar yang mengerjakan distribusi misalnya pizza untuk Mario’s Pizzeria, konsumen yang memesan dan menerima pizza mewakili subjek data, sedangkan Mario’s Pizzeria yang menggunakan robot pengantar untuk mendistribusikan pizza ke klien mewakili pemroses data. Apabila sekarang diasumsikan bahwa Mario’s Pizzeria disubkontrakkan untuk pengiriman pizza mereka melalui robot pengiriman Starship Technologies, Starship Technologies memiliki dan mengontrol layanan pengiriman. Jadi, Starship Technologies adalah pengontrol data dalam pengertian GDPR. Perbedaan ini penting untuk pertimbangan kepatuhan karena GDPR memperlakukan pengontrol data sebagai pihak utama untuk tanggung jawab, seperti mengumpulkan persetujuan, mengelola pencabutan persetujuan, mengaktifkan hak untuk mengakses, dan hal lainnya. Oleh karena itu, subjek data yang ingin mencabut persetujuan untuk data pribadinya akan menghubungi pengontrol data untuk memulai permintaan, bahkan jika data tersebut disimpan di server pemroses data. Dalam kasus permintaan seperti itu, pengontrol data kemudian harus meneruskan permintaan tersebut ke pemroses data untuk menghapus data yang dicabut dari servernya. Dengan demikian, GDPR berlaku untuk semua proses, terlepas dari apakah organisasi tersebut berlokasi di dalam atau di luar UE. Hal ini memperkenalkan kewajiban langsung bagi pemroses data serta

situasi yang akan dikenakan hukuman dan tuntutan perdata. Kondisi ini menunjukkan perbedaan penting pada aturan lama yang hanya meminta pengontrol data bertanggung jawab atas ketidakpatuhan perlindungan data. Jadi, dengan mengingat kembali Pasal 28 (1), pengontrol data hanya boleh memilih pemroses yang mematuhi GDPR untuk menghindari hukuman itu sendiri.

Dalam penerapan GDPR pada robot pengiriman otonom, masalah kontroversial pertama muncul dalam hal data pribadi yang dikumpulkan dan ditransmisikan selama pengiriman jarak jauh oleh robot tersebut. Seperti halnya proses pengiriman lainnya, data pribadi konsumen diperlukan untuk memenuhi 6R logistik, yaitu untuk membawa produk yang tepat (*right product*), pada waktu yang tepat (*at the right time*), dalam jumlah dan kualitas yang tepat (*in the right quantity and quality*), ke tujuan yang tepat (*to the right destination*), dan dengan biaya yang tepat (*with the right cost*). Data pribadi yang sesuai termasuk alamat, keuangan, dan data biografi ditambah data penyempurnaan pribadi dihasilkan dari hubungan bisnis dengan konsumen. Yang lebih bermasalah adalah gambar, rekaman suara, dan film yang diambil oleh robot pengirim untuk memberikan bukti jika terjadi kecelakaan yang diakibatkan oleh robot—materi yang pasti juga mengandung informasi visual dan audio tentang individu manusia yang bergerak di sekitar robot. Data ini dikumpulkan di ruang publik sehingga foto-foto, rekaman suara, dan rangkaian video orang perseorangan ini dianggap sebagai “data pribadi” oleh GDPR. Data ini dipertukarkan melalui internet dan jaringan telekomunikasi, sebelum dipertimbangkan dan dianalisis oleh kontrol pribadi dan sistem TI mereka. Kemudian, data tersebut disimpan dalam *database* pusat kendali pengiriman perusahaan.

Robot-robot ini juga dapat melanggar Pasal 25, yang menyerukan penerapan privasi berdasarkan desain atau privasi secara *default/privacy by default* (PbD). Privasi secara *default* berarti bahwa pengontrol data harus menerapkan langkah-langkah yang tepat dan teknis untuk memastikan bahwa secara *default*, hanya data pribadi yang diperlukan (dan pada jumlah, periode penyimpanan, dan

aksesibilitas yang diperlukan) untuk masing-masing tujuan pemrosesan tertentu yang diproses. Pasal 23 melengkapi prinsip ini dengan kewajiban untuk memastikan bahwa secara *default*, data pribadi ini tidak dapat diakses tanpa intervensi individu kepada sejumlah orang yang tidak terbatas. Langkah-langkah yang tepat disebutkan dalam Pasal 28 (1) untuk memberikan “jaminan yang memadai untuk menerapkan langkah-langkah teknis dan organisasional yang tepat sedemikian rupa sehingga pemrosesan akan memenuhi persyaratan peraturan dan memastikan perlindungan hak-hak subjek data”. Pasal 32 terus menuntut “Keamanan pemrosesan” dengan “memperhitungkan keadaan, biaya implementasi dan sifat, ruang lingkup, konteks dan tujuan pemrosesan serta risiko berbagai kemungkinan dan tingkat keparahan untuk hak dan kebebasan orang-orang. Tujuan-tujuan ini harus dilaksanakan dengan langkah-langkah teknis dan organisasi yang tepat untuk memastikan tingkat keamanan yang sesuai dengan risiko, termasuk antara lain yang sesuai:

- a) pseudonimisasi dan enkripsi data pribadi;
- b) kemampuan untuk memastikan kerahasiaan, integritas, ketersediaan, ketahanan sistem dan layanan pemrosesan yang berkelanjutan;
- c) kemampuan untuk memulihkan ketersediaan dan akses ke data pribadi secara tepat waktu jika terjadi insiden fisik atau teknis; dan,
- d) sebuah proses untuk secara teratur menguji, menilai dan mengevaluasi efektivitas langkah-langkah teknis dan organisasi untuk memastikan keamanan pemrosesan.

Sayangnya, Pasal 32 GDPR tidak begitu jelas dalam mendefinisikan langkah-langkah teknis dan organisasi yang sesuai yang harus diadopsi perusahaan untuk mematuhi peraturan. Namun, untuk mengawasi kepatuhan dalam organisasi, Petugas Perlindungan Data harus ditunjuk dan akan terlibat dalam semua masalah yang berkaitan dengan perlindungan data pribadi dan siapa yang akan bekerja secara independen, memantau kepatuhan terhadap GDPR, melapor ke

manajemen tingkat tertinggi, dapat dijangkau oleh subjek data, dan bekerja sama dengan otoritas pengawas.

Setelah data masuk ke dalam cakupan penerapan GDPR, peraturan tersebut memberikan instruksi yang ketat tentang bagaimana data ini dapat digunakan. Robot pengiriman otonom tersebut bertindak sebagai perangkat yang mengumpulkan, memproses, dan mentransfer data pengguna pasal 25 GDPR mengenai perlindungan data berdasarkan desain dan secara *default*, yaitu sistem robot otonom harus mengambil langkah-langkah teknis dan organisasi yang sesuai untuk “memastikan bahwa, dengan default, hanya data pribadi yang diperlukan untuk setiap tujuan pemrosesan tertentu yang diproses. Kewajiban itu berlaku untuk jumlah data pribadi yang dikumpulkan, tingkat pemrosesannya, periode penyimpanannya, dan aksesibilitasnya. Secara khusus, langkah-langkah tersebut harus memastikan bahwa secara *default*, data pribadi tidak dapat diakses tanpa campur tangan individu untuk sejumlah orang yang tidak terbatas”. Akibatnya, produsen robot pengirim harus menjaga bahwa tindakan perlindungan data telah diambil, misalnya nama samaran data pribadi oleh pengontrol pada tahap awal pengumpulan data dan saat komunikasi antara robot dan pusat kendali jarak jauh dijalankan melalui tautan nirkabel, data pribadi (termasuk foto dan video) harus dienkripsi. Kedua, pengumpulan data robot harus dibatasi pada apa yang diperlukan dan transparansi harus dijaga “berkenaan dengan fungsi dan pemrosesan data pribadi agar subjek data dapat memantau pemrosesan data dan pengontrol untuk membuat dan meningkatkan fitur keamanan”. Ini mensyaratkan bahwa semua data pengguna yang diperoleh harus dapat diakses dan portabel oleh setiap penduduk UE dengan asumsi bahwa data pribadinya dikumpulkan oleh robot (foto dan video) dan diberikan kemungkinan untuk meminta data ini dalam format yang kompatibel secara luas sehingga memungkinkan untuk memverifikasi mana data yang benar-benar telah diperoleh. Ketiga, “prinsip-prinsip perlindungan data berdasarkan desain dan *default* juga harus dipertimbangkan ketika mengembangkan, merancang, memilih, dan menggunakan aplikasi, layanan, dan produk yang

didasarkan pada pemrosesan data pribadi atau memproses data pribadi untuk memenuhi tugasnya. Produsen harus didorong untuk mempertimbangkan hak atas perlindungan data ketika mengembangkan dan merancang produk, layanan dan aplikasi tersebut dan, dengan memperhatikan keadaan, untuk memastikan bahwa pengontrol dan pemroses mampu memenuhi kewajiban perlindungan datanya”.

Namun, bukan hanya produsen, pemroses, dan pengontrol robot pengiriman yang dapat dimintai pertanggungjawaban atas pelanggaran GDPR, melainkan juga penyedia layanan telekomunikasi yang digunakan oleh pengontrol untuk mengirimkan data dari robot pengirim melalui jaringan penyedia layanan telekomunikasi harus mematuhi GDPR, yaitu mengambil tindakan perlindungan teknis masing-masing dan menyimpan data ini hanya dalam batas Pasal 25 GDPR.

Manajer Bisnis Regional Starship untuk Eropa Tengah, Hendrik Albers, baru-baru ini membahas GDPR secara eksplisit dalam konteks disrupsi inovatif. Albers memperingatkan untuk tidak terlalu mengatur rezim perlindungan data Eropa dan mengusulkan untuk menciptakan keseimbangan yang layak antara inovasi dan privasi bagi konsumen. Dalam kasus Starship, perusahaan menurut Hendrik Albers telah mengembangkan rutinitas yang sangat tepat untuk memastikan keseimbangan ini tetap terjaga. Menurut pendapat Albers, sebagian besar perusahaan yang mengumpulkan data konsumen melakukannya dengan cara yang baik untuk menguntungkan konsumen daripada memasarkan data konsumen untuk menghasilkan keuntungan. Dengan demikian, dia menekankan pendekatan privasi yang memberikan kebebasan yang cukup besar bagi perusahaan. Dalam hal layanan pengiriman, dia menunjukkan bahwa ada kebutuhan penting untuk mengetahui di mana konsumen berada untuk mengirimkan barang sedekat mungkin dengan konsumen. Selain itu, layanan pengiriman juga perlu diberi tahu tentang beberapa detail pribadi kepada organisasi pengiriman barang yang efisien, karena konsumen tidak akan dapat menerima pengiriman jika peraturan melarang pengumpulan barang secara berlebihan.

Meskipun mungkin tidak mengherankan bahwa Albers mengambil pendekatan yang agak liberal dengan tidak memasukkan aktivitas robot Starship di bawah GDPR, harus diakui bahwa, memang, dalam kasus layanan pengiriman, terutama dalam kasus robot pengiriman otonom yang sebagian dikendalikan dari jarak jauh melalui jaringan telekomunikasi, fokus utama di bidang privasi masih pada data konsumen yang merupakan aspek yang paling tidak kontroversial. Data pribadi yang dikumpulkan oleh sensor, mikrofon, dan kamera, dan yang ditransfer melalui tautan telekomunikasi hingga saat ini belum menjadi agenda utama—terlepas dari pelanggaran nyata terhadap GDPR oleh banyak pengumpulan data.

Lingkungan organisasi dari kontrol robot pengiriman harus dapat menunjukkan kepatuhan terhadap GDPR, yaitu pengontrol data harus menerapkan langkah-langkah yang memenuhi prinsip perlindungan data berdasarkan desain dan perlindungan data secara default. Selanjutnya, pengontrol data bertanggung jawab untuk menerapkan langkah-langkah efektif dan harus mampu menunjukkan kepatuhan aktivitas pemrosesan meskipun pemrosesan dilakukan oleh pemroses data atas nama pengontrol. Pasal 25 menyatakan bahwa Penilaian Dampak Perlindungan Data harus dilakukan ketika risiko tertentu terjadi pada hak dan kebebasan subjek data, dan Pasal 37–39 menyatakan bahwa Petugas Perlindungan Data harus memastikan kepatuhan dalam organisasi. Dalam kasus ketidakpatuhan terhadap tiga aturan utama ini, hukuman ketat berlaku mulai dari € 20 juta dan mencapai hingga 4% dari omset global perusahaan. Selain itu, perlu diingat bahwa tidak ada masa tenggang, yaitu GDPR berlaku penuh sejak 25 Mei 2018.

4. Perundang-undangan Robot Pengiriman

Robot pengiriman sebagai bagian dari distribusi *business-to-consumer* (B2C) saat ini menarik perhatian dan mewakili sektor bisnis yang berkembang yang tidak hanya didorong oleh penyedia layanan logistik tradisional, tetapi juga oleh sejumlah perusahaan rintisan yang berlokasi di seluruh dunia. Perangkat yang ada masih dalam

tahap uji coba, dan kasus yang dipertimbangkan menunjukkan bahwa area operasi utama adalah bisnis pangan, bunga, dan sembako di mana robot dipekerjakan oleh manusia. Kasus Starship Technologies mengungkapkan bahwa robot pengiriman dapat dianggap sebagai sistem *cyber-fisik* (CPS) karena mereka diatur sendiri, dioptimalkan sendiri, dan terhubung ke internet,—tetapi mereka otonom hanya hingga 90%, dalam artian pengorganisasian mandiri penuh masih menjadi masalah di masa depan.

Fitur penting lainnya dari publikasi Industri 4.0 berkaitan dengan komunikasi dan interaksi mesin-ke-mesin (M2M) yang terhubung berbasis internet serta kemampuan untuk terintegrasi ke dalam proses lintas perusahaan yang menjaga kemampuan untuk beroperasi di lingkungan manufaktur dan logistik berjejaring. Di sini, penelitian menunjukkan bahwa teknologi M2M saat ini hanya terwujud sebagian—misalnya, dalam solusi RoboVan, di mana van bertindak sebagai hub (pusat) yang berkomunikasi dengan robot pengiriman sebagai pengumpan. Namun, organisasi robot pengiriman yang dipandu sendiri dan berbasis M2M yang mengintegrasikan diri mereka ke dalam rantai pasok penuh dan mewujudkan secara mandiri pengiriman mil terakhir tanpa diskontinuitas media, yaitu tanpa campur tangan tenaga kerja manusia, masih akan datang. Tolok ukur sistem tersebut adalah pilot project “AMATRAK” di ISL Bremen, yang mewujudkan sistem transportasi peti kemas mandiri, di mana peti kemas dapat memilih dan memesan alat angkut yang sesuai dan optimal, sesuai dengan kebutuhan mereka sendiri.

Keunggulan kompetitif robot pengiriman otonom dibandingkan dengan mode pengiriman lainnya adalah biaya rendah kurang dari € 1 per unit yang membuatnya hingga 15 kali lebih murah daripada layanan pengiriman tradisional. Radius pengiriman mereka yang terbatas, bersama dengan fakta bahwa robot pengiriman berbasis darat harus berbagi trotoar dengan pejalan kaki dan lalu lintas lainnya, menjadikan area operasi yang mereka sukai adalah di pinggiran kota dan area lalu lintas dengan kepadatan rendah, yang menjadikannya layanan pengiriman untuk melengkapi yang sudah ada.

Aspek penting lainnya yang belum menjadi fokus diskusi di kalangan *robot-friendly* adalah pertanyaan sejauh mana masyarakat sebenarnya akan siap menerima penggunaan robot pengiriman. Penggunaan trotoar bersama antara robot pengantar dan pejalan kaki saat ini telah menyebabkan masalah penerimaan yang cukup besar di beberapa tempat yang dinyatakan dalam kondisi kerangka hukum yang berbeda, tergantung pada lokasinya. Beberapa di antaranya dapat secara serius membahayakan model bisnis robot pengiriman. Di sisi lain, Estonia, misalnya, telah mengadaptasi undang-undang lalu lintasnya untuk penggunaan ruang bersama bagi manusia dan robot, sedangkan negara lain masih ragu-ragu. Amerika Serikat (AS) mengungkapkan bahwa tidak semua bagian masyarakat menyambut baik berbagi trotoar dengan robot. Saat ini, sejumlah negara bagian di Amerika Serikat mengizinkan robot untuk berpartisipasi dalam lalu lintas dan menyesuaikan dengan undang-undang lalu lintas negara bagian mereka. Pada saat yang sama, di beberapa negara bagian, kota tertentu merumuskan undang-undang lalu lintas mereka sendiri tentang robot yang membuat AS menjadi tambal sulam hukum yang sangat beragam dengan undang-undang yang berubah dan sebagian bertentangan untuk operasi robot dalam lalu lintas. Baru-baru ini, kasus undang-undang anti-robot San Francisco mendapat liputan media yang luas ketika mereka melarang perangkat pengiriman otonom dari sebagian besar trotoar dan mengizinkannya hanya di zona lalu lintas pejalan kaki yang rendah (Simon, 2017). Sementara itu, di tempat-tempat tertentu beberapa spesimen berkeliaran di trotoar kota hari ini diamati dengan rasa ingin tahu, persepsi publik mulai memburuk di beberapa kota dengan “populasi” robot pengiriman yang lebih tinggi—misalnya di San Francisco, pemerintah setempat pada awal Desember 2017 mengeluarkan peraturan ketat tentang robot pengiriman, pembatasan izin untuk robot “pada tiga per perusahaan, dan sembilan total pada waktu tertentu untuk seluruh kota. Robot sekarang hanya akan diizinkan untuk beroperasi di lingkungan industri tertentu, di jalan dengan trotoar selebar 6 kaki, dan harus ditemani oleh pendamping manusia setiap saat” (Wong, 2018). Kota bereaksi seperti ini terhadap protes oleh “koalisi penduduk, pendukung pejalan

kaki, dan aktivis untuk manula dan penyandang cacat”, mengklaim bahwa “trotoar bukanlah taman bermain untuk mainan baru yang dikendalikan dari jarak jauh dari orang pintar untuk menghasilkan uang dan menghilangkan pekerjaan”.

Selain diskusi peraturan yang sedang berlangsung di seluruh dunia, kondisi kerangka penting lainnya didedikasikan dalam izin pengiriman *drone*. Baik Virginia, Amerika Serikat dan Idaho mengizinkan robot untuk beroperasi secara mandiri, tetapi di Virginia, undang-undang mengizinkan robot berbasis darat untuk beroperasi hingga berat kurang dari 50 pon, di Idaho batas berat legal adalah 80 pon. Contoh-contoh yang dibahas ini menunjukkan bahwa robot pengiriman menghadapi lanskap peraturan hukum yang tersebar bahkan di setiap negara, yang membuat operasi mereka menjadi lebih sulit.

Terakhir, peraturan perlindungan data UE yang baru merumuskan tantangan baru untuk pengembangan dan pengoperasian robot pengiriman. Kasus-kasus yang dipertimbangkan mengungkapkan bahwa hingga saat ini, masalah perlindungan data tidak menjadi agenda utama dunia robot pengiriman. Namun, karena Peraturan Perlindungan Data Umum Eropa yang baru mulai berlaku pada 25 Mei 2018, sejumlah besar data yang diperlukan untuk mengoperasikan robot pengiriman harus dianggap sebagai data pribadi yang tidak hanya diproses secara lokal di robot, tetapi juga ditransfer dan disimpan melalui tautan internet. Akibatnya, aturan perlindungan data yang berlaku harus diperhitungkan dalam desain robot. Meskipun sebagian, mungkin ada kepentingan sah dari pengguna/pengontrol untuk mengumpulkan dan memproses demi mencegah bahaya bagi pengamat dan untuk menjaga integritas robot, ada sedikit atau tidak ada kesadaran tentang adanya pengumpulan data pribadi dari setiap individu manusia di sekitar robot yang bergerak di luar kebutuhan mutlak memerlukan persetujuan eksplisit dari masing-masing individu, yang secara praktis tidak mungkin diperoleh, yang berarti bahwa GDPR umumnya dilanggar oleh robot pengiriman yang mengumpulkan informasi ini.

Sebagai kesimpulan, robot pengiriman tampaknya mampu menjawab “mata rantai yang hilang” antara logistik grosir dan konsumen, dan harapan bahwa mereka akan sangat berkontribusi untuk memecahkan masalah terakhir dalam waktu dekat juga dilihat sebagai potensi. Solusi teknis saat ini hanya mewujudkan sebagian dari konsep Industri 4.0, tetapi pandangan yang lebih dekat ke indikator pendanaan dan pertumbuhan mengungkapkan bahwa seluruh sektor robot sangat dinamis dan mewakili pasar yang tumbuh kuat untuk tahun-tahun mendatang, terutama dengan latar belakang logistik ramah lingkungan (misalnya, melalui koridor transportasi hijau) dan kombinasi robot pengiriman dan kecerdasan buatan.

Subbab ini telah menjelaskan dua aspek di mana tantangan besar akan muncul di masa depan (dan sebagian bahkan hari ini), menjadi tanggung jawab yang ketat untuk kecelakaan yang disebabkan oleh robot pengiriman di bawah undang-undang lalu lintas dan hukuman yang cukup besar jika terjadi pelanggaran persyaratan GDPR oleh pengiriman mekanisme pengumpulan dan transmisi data oleh robot.

Aspek lain yang kurang legal dan dapat menghambat keberhasilan robot pengiriman di masa depan sebagai model bisnis adalah pertanyaan seberapa besar masyarakat—dan pemerintah—akan menyambut penggunaan trotoar oleh robot pengiriman. Kerangka hukum terkait yang berkembang di sekitar sektor robot pengiriman mewakili tambal sulam aturan yang berbeda di tingkat nasional, regional, dan kota sehingga rumit untuk mewujudkan keunggulan kompetitif dari model bisnis robot pengiriman untuk mil terakhir.

Meskipun harus diakui bahwa semua teknologi baru yang hebat sejauh ini menghadapi *hype* awal bersama dengan protes awal besar-besaran sebelum diterima secara luas kemudian, seorang pengusaha yang tertarik harus menyadari bahwa beberapa ketekunan mungkin diperlukan setelah model bisnis ini dipilih, yaitu bahwa pembatasan hukum dalam waktu dekat dapat menghambat daripada memfasilitasi penggunaan robot pengiriman. Penjelasan ini memberikan wawasan yang divalidasi secara empiris dalam perkembangan terkini di sektor robot pengiriman, tetapi dengan mempertimbangkan karakter

dinamis dan inovatif yang tinggi dari seluruh sektor, gambaran tersebut hanya dapat memberikan gambaran aktual tentang evolusi robot pengiriman.

Bab berikutnya akan mendiskusikan teknologi printer pangan 3 dimensi (3D). Sebagai jembatan penghubung sebelum kita memulai langkah di Bab XII, kita bisa mengetahui terlebih dahulu bahwa printer 3D yang dikombinasikan dengan robot industri bisa menjadi pendekatan baru yang menjanjikan untuk sektor manufaktur tanpa terkecuali di bidang pangan. Dua pendorong utama perkembangannya antara lain kebutuhan untuk membuat objek besar lebih akurat dan berulang kali secara aditif, dan peluang untuk mencapai produksi yang lebih otomatis dan terintegrasi dengan printer 3D. Seiring berkembangnya teknologi manufaktur, kombinasi ini dapat menjadi salah satu solusi untuk pertumbuhan menuju digitalisasi yang lebih besar dan manufaktur yang cerdas.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB 12

Printer Pangan 3 Dimensi

A. Cara Baru Mengolah Pangan

Ada kebutuhan pasar yang meningkat untuk produk pangan yang dikustomisasi, yang sebagian besar saat ini dirancang dan dibuat oleh pengrajin khusus yang terlatih. Biaya untuk pangan ini relatif mahal. Pencetakan pangan tiga dimensi (3D), juga dikenal sebagai *Food La-yered (FLM) Manufacture* (Wegrzyn dkk., 2012). Pencetakan pangan 3D bertujuan untuk menghasilkan objek pangan 3D yang dirancang khusus dengan cara lapis demi lapis, tanpa perkakas khusus, cetakan, atau campur tangan manusia. Dengan demikian, teknologi ini dapat meningkatkan efisiensi produksi dan mengurangi biaya produksi untuk fabrikasi produk pangan yang dikustomisasi.

Pencetakan pangan 3D ini juga sangat berkaitan dengan bab sebelumnya, yaitu teknologi robotik. Memasak adalah salah satu kegiatan terpenting dalam hidup kita. Koki robot yang mampu mengikuti resep akan memiliki banyak aplikasi baik di lingkungan rumah tangga maupun industri, misalnya robot kue kering dapat mengambil bahan,

mencampurnya dalam urutan yang benar, dan menempatkan adonan yang dihasilkan ke dalam loyang oven. Robot ini dapat melakukan tugas sehari-hari dan beberapa tindakan dasar, seperti mengambil objek, meletakkannya, atau menuangkan. Teknik berbasis robotika yang digunakan dalam pembuatan pangan untuk produksi massal, umumnya dirancang untuk mengotomatisasi proses manual. Mereka dapat mengurangi beban kerja, menghemat biaya tenaga kerja, dan meningkatkan efisiensi produksi pangan.

Dalam beberapa tahun terakhir, pencetakan 3D menjadi penting dengan adanya kemajuan di bidang robotika. Kita bisa menemukan banyak aplikasi di berbagai sektor industri termasuk otomotif, obat-obatan, tekstil, teknik sipil, militer, dan aplikasi pangan. Pencetakan 3D adalah teknik manufaktur aditif. Ketika diterapkan pada pangan, pencetakan 3D dapat disebut sebagai manufaktur pangan berlapis/*food-layered manufacture* (FLM). Konsep ini muncul pada akhir 1980-an dengan fokus pada pembuatan prototipe cepat. Teknik prototipe cepat termasuk pencetakan 3D dan pendekatan lain, seperti pembuatan objek laminasi dan pembuatan partikel balistik. Saat ini, ada perbedaan tajam antara teknik prototipe cepat dan pencetakan 3D dalam hal biaya. Pencetakan 3D ini lebih murah, mulai dari US\$10.000. Sementara itu, mesin *prototyping* lainnya dapat berharga sekitar US\$500.000 untuk aplikasi serupa. Keuntungan utama lainnya dari teknologi pencetakan 3D adalah dapat digunakan dengan alat bantu desain berbantuan komputer (*computer aided design/CAD*).

Dibedakan dari teknologi berbasis robotika, pencetakan pangan mengintegrasikan pencetakan 3D/*3D printing* (3DP) dan teknik gastronomi digital²¹ untuk memproduksi potongan pangan dengan kustomisasi massal dalam bentuk, warna, rasa, tekstur, dan bahkan nilai gizi. 3DP adalah proses konstruksi robotik yang dikendalikan secara digital dengan membangun bentuk padat yang kompleks lapis demi lapis dan menerapkan transisi fase atau reaksi kimia untuk menyatukan lapisan. Gastronomi digital adalah teknik yang

²¹ Gastronomi digital adalah visi kuliner yang memadukan masakan tradisional dengan kemampuan komputasi baru.

menerapkan pengetahuan proses memasak dalam fabrikasi pangan sehingga pengalaman makan kita melampaui rasa untuk mencakup semua aspek gastronomi. Menggabungkan 3DP dan teknik gastronomi digital dapat memvisualisasikan manipulasi pangan secara digital, sehingga menciptakan ruang baru untuk fabrikasi pangan dengan harga terjangkau. Akibatnya, desain pangan yang dikustomisasi dalam bentuk model 3D digital akan langsung ditransformasikan menjadi produk jadi dalam struktur berlapis.

1. Konsep Printer Pangan

Desain dan prototipe konsep printer pangan generasi pertama telah muncul ke domain publik. Dalam sejarah singkat, beberapa proyek penelitian dilakukan mulai dari desain konsep hingga penelitian mendalam tentang ekstrusi dan deposisi material. Nanotek Instruments Inc. mematenkan metode pembuatan prototipe dan fabrikasi cepat untuk objek pangan 3D pada tahun 2001, seperti kue ulang tahun yang dirancang khusus. Namun, tidak ada prototipe fisik yang dibangun. Nico Kläber mengeluarkan desain konsep Moléculaire dalam kompetisi Electrolux Design Lab, yang memasukkan gastronomi molekuler ke dalam desain printer pangan. Konsep ini bertujuan untuk mencetak banyak bahan menggunakan lengan robot kecil dan menciptakan pangan yang sepenuhnya dapat disesuaikan dengan makanan biasa. Philips Food Creation Printer memperkenalkan kartrid pangan untuk membuat produk pangan yang dirancang khusus secara berlapis. Antarmuka pengguna interaktif dipakai untuk memilih bahan, jumlah, bentuk, tekstur, dan sifat pangan lainnya. Ide ini mungkin berlaku untuk semua jenis pencetakan pangan 3D yang dikustomisasi. Namun, semua desain konsep ini tampak belum realistis dan belum memiliki potensi implementasi.

Dalam gastronomi digital, bahan dapat ditentukan berdasarkan informasi *online* tentang kandungan nutrisi, preferensi pribadi dan sosial. Massachusetts Institute of Technology (MIT) memperkenalkan konsep gastronomi digital ke dalam desain printer pangan dan mempresentasikan tiga desain konseptual seperti yang ditunjukkan

pada Tabel 12.1 (Zoran & Coelho, 2011). Masing-masing berfokus pada aspek gastronomi yang berbeda mulai dari pencampuran, pemodelan hingga transformasi. Konsep-konsep ini tampak lebih realistis dibandingkan dengan desain konseptual sebelumnya tetapi masih jauh untuk layak secara teknis.

Tabel 12.1 Ringkasan Desain Konseptual pada Printer Pangan

	Fokus Konsep	Platform Digital	Kesulitan
Mixer Virtuoso	Menggabungkan dan mencampur beragam bahan untuk mengontrol jumlah, jenis, dan sumbernya.	<ul style="list-style-type: none"> a) Lapisan atas: wadah penyimpanan untuk memantau suhu, kelembapan, dan berat. b) Lapisan kedua: ruang pemrosesan yang didedikasikan untuk mencampur, mengaduk, dan menghancurkan. c) lapisan bawah: unit ekstrusi dengan kontrol termo. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Distribusi dan desain pengukuran antar lapisan, b) Pembersihan mesin c) Minimalisasi limbah
Fabrikasi digital	memodelkan dan memasak kombinasi bahan menjadi bentuk tertentu dengan dimensi yang ditentukan.	<ul style="list-style-type: none"> a) Kaleng pangan berpendingin b) Kepala pencampuran/pence-takan tiga sumbu ke permukaan pencetakan c) Ruang fabrikasi 	<ul style="list-style-type: none"> a) Isi ulang tabung b) Pembersihan mesin c) Pasokan bahan ke kepala pencampuran dan sistem penyimpanan
Koki robot	Mengolah bahan yang ada hingga mendapat rasa dan pola desain pangan yang baru	<ul style="list-style-type: none"> a) Dua lengan robot dengan lima <i>degree of freedom</i>. b) Kepala alat untuk melokalisasi transformasi, seperti pengeboran, pemotongan, dan pengeluaran melalui jarum suntik 	<ul style="list-style-type: none"> a) Desain dan program untuk membuat beragam bentuk pangan b) Rekayasa yang rumit

Fokus Konsep	Platform Digital	Kesulitan
	c) Alas pemanas untuk memotong/memasak/sintering ²²	

Sumber: Zoran dkk. (2011)

Pencetakan 3D adalah proses digital yang melibatkan konstruksi lapis demi lapis dari geometri padat yang kompleks, mengikatnya bersama-sama baik dengan transisi fase atau reaksi kimia. Hal ini berbeda dari manufaktur pangan berbasis robot di mana pencetakan pangan memungkinkan pengguna untuk merancang dan membuat pangan dengan bentuk, warna, rasa, dan kebutuhan nutrisi yang dikustomisasi. Mencakup semua aspek gastronomi, teknologi ini dapat menciptakan pengalaman konsumen yang berbeda untuk mencicipi pangan.

Pencetakan pangan 3D mengikuti proses sekuensial. Proses ini dimulai dengan merancang model CAD 3D dari geometri yang dibutuhkan, baik model yang dibuat atau geometri dipindai untuk mendapatkan informasi maksimum dari fitur permukaannya. Kemudian, dengan menggunakan perangkat lunak pengiris yang sesuai, dimulailah proses pengirisan menjadi lapisan-lapisan individu. Selama proses ini, kode mesin dihasilkan untuk setiap lapisan yang diiris. Setelah ini, kode-G dan kode-M yang dihasilkan ditransfer ke printer untuk mencetak resep pilihan. Kode-G mengacu pada bahasa kontrol numerik yang dihasilkan oleh perangkat lunak CAD untuk memandu motor bergerak ke wilayah pencetakan, kecepatan pencetakan, dan sumbu pencetakan. Kode-M mengacu pada perintah bantu yang membantu fungsi mesin. Setelah menjadi matriks yang kompleks, sistem pangan memerlukan perangkat lunak pengiris adaptif untuk pencetakan. Ini terkait dengan tantangan dalam membuat kode-G karena menyiratkan persyaratan ruang memori yang tinggi. Dalam hal ini, timbul kesulitan untuk diproses karena kompleksitas yang terlibat dalam pemrosesan data yang luas (file STL). Hal ini berimplikasi pada

²² *Sintering* atau *frittage* adalah proses pepadatan dan pembentukan massa bahan padat dengan panas atau tekanan tanpa melelehkannya sampai titik likuifaksi.

kualitas pangan fabrikasi dan persyaratan waktu proses (Brown dkk., 2014). Perangkat lunak yang berbeda tersedia untuk pemindaian, pengembangan model, dan aplikasi pencetakan. Penggunaan pilihan perangkat yang berbeda tersebut tergantung pada keahlian pengguna dan fitur yang diperlukan.

Printer 3D terdiri dari (1) sirkuit kontrol untuk mengintegrasikan komputer dan printer; (2) motor, filamen, dan sistem penggerak untuk memandu motor; (3) ruang pencampuran untuk menyimpan dan mencampur pasokan bahan; (4) rol umpan; (5) sensor aliran; (6) pengatur tekanan; (7) nozel; dan (8) platform pencetakan tempat pangan dicetak. Platform pencetakan terdiri dari tahap tiga sumbu (koordinat Cartesian), unit pengeluaran/sintering, dan antarmuka pengguna. Dengan kontrol digital atas sistem pengumpanan material, seseorang dapat memanipulasi proses fabrikasi untuk memenuhi harapan konsumen.

Pangan dapat dicetak di platform komersial atau menggunakan platform yang dikembangkan sendiri. Tidak ada printer standar yang tersedia untuk pencetakan pangan 3D, tetapi printer dapat disesuaikan untuk memenuhi persyaratan pencetakan tertentu. Platform komersial adalah versi yang diubah dari platform yang ada (*open source*/sumber terbuka yang tersedia). Hal ini melibatkan penggantian kepala cetak dengan yang dapat mengontrol laju aliran atau yang memiliki kemampuan untuk menggunakan bahan *food grade* sebagai pengikat untuk proses tersebut. Contoh klasik termasuk sistem Fab@home™ dan Frostruder MK2™. Beberapa contohnya adalah objek 3D berbasis keju dan cokelat yang dicetak dari bahan yang dapat dimakan, dan struktur gula 3D yang dibuat menggunakan mesin laser yang dikendalikan komputer. Fabrikasi di platform yang dikembangkan sendiri fleksibel karena kemampuan untuk memasukkan variasi yang luas dalam pasokan material.

2. Platform untuk Printer Pangan

Platform printer pangan pada dasarnya terdiri dari tahap tiga sumbu XYZ (sistem koordinat Cartesian), unit pengeluaran/sintering, dan

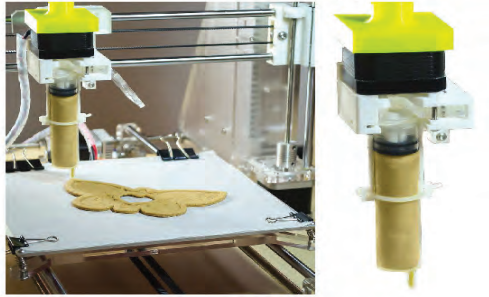
antarmuka pengguna. Dengan panggung bermotor tiga sumbu yang dikendalikan komputer dan sistem pengumpanan material, platform tersebut dapat memanipulasi pangan secara *real-time*. Komposisi pangan dapat disimpan pada dasarnya titik demi titik dan lapis demi lapis sesuai dengan pemodelan desain terkomputerisasi dan perencanaan jalur. Untuk menciptakan dan mempersonalisasi hidangan baru setidaknya ada empat fungsi yang diusulkan, yaitu pengukuran, pencampuran, pengeluaran, dan pemasakan (pemanasan atau pendinginan) (Zoran dkk., 2011). Hanya fungsi pengeluaran dan memasak yang tersedia di platform printer pangan komersial.

a. Printer Pangan Berdasarkan Platform Komersial

Untuk menyederhanakan proses pengembangan dan mempersingkat waktu pengembangan, para peneliti memodifikasi platform pencetakan 3D *open source* komersial yang tersedia untuk tujuan pencetakan pangan. Salah satu modifikasi umum adalah mengganti *printhead*/kepala cetak asli dengan unit pengeluaran yang dirancang khusus dan katup tambahan untuk mengontrol laju pengumpanan material, atau mengganti pengikat *inkjet* standar dengan bahan *food grade* seperti campuran pati.

Sistem Fab@Home adalah salah satu fabrikator desktop universal yang kompatibel dengan bahan pangan, meskipun pada dasarnya tidak dirancang khusus untuk aplikasi pangan. Para peneliti juga mengintegrasikan Frostruder MK2 pada platform MakerBot untuk menghilangkan embun beku, di mana dua katup solenoid digunakan untuk mengontrol laju aliran selai kacang, krim, jeli, dan Nutella. Gambar 12.1 menunjukkan platform pencetakan pangan dengan *printhead* yang dikembangkan di National University of Singapore. Platform ini dibangun berdasarkan platform Prusa i3 yang dimodifikasi dengan *printhead* ekstrusi yang dikembangkan sendiri.

Dengan platform komersial yang dimodifikasi, peneliti dapat dengan cepat membuat bentuk pangan yang kompleks dan membandingkan bahan dan proses fabrikasi berbagai bahan pangan. Meskipun demikian, platform tersebut kurang fleksibel untuk perbaikan lebih



Sumber: Sun dkk. (2015)

Gambar 12.1 Platform Pencetakan Pangan (kiri) dan Kepala Cetaknya (kanan)

lanjut. Platform tersebut hanya berlaku untuk bahan yang terbatas dan tidak dapat mendukung penelitian mendalam.

b. Printer Pangan Berdasarkan Platform yang Dikembangkan Sendiri

Platform yang dikembangkan sendiri dibangun berdasarkan persyaratan khusus, seperti membuat struktur 3D dengan mesin laser yang dikendalikan komputer, membuat objek keju dan cokelat 3D dari bahan yang dapat dimakan, atau mengurangi biaya dengan fabrikasi bentuk bebas produk gula dengan perangkat keras *open source* (Oskay, 2009). Mereka memberikan lebih banyak pilihan untuk pengeluaran material sehingga *printhead* yang sesuai dapat dirancang dan diimplementasikan di antara beberapa kandidat, parameter pengeluaran dan proses fabrikasi dapat lebih fleksibel dan dioptimalkan.

Dalam platform komersial dan yang dikembangkan sendiri, gerakan mekanis substrat dan kepala pengeluaran dicapai melalui tahap yang dikendalikan komputer. Dalam proses pencetakan, model 3D digital dapat diubah menjadi data beberapa lapisan (file STL), kemudian data ini akan diinterpretasikan menjadi sinyal penggerak ke motor penggerak melalui pengontrol yang diatur. Prosedur pemindahan dan pengeluaran yang sama diulang untuk setiap lapisan dengan

bentuk dan dimensi karakteristiknya sendiri. Kombinasi lapisan ini membentuk objek 3D yang lengkap.

c. Desain Antarmuka Kontrol Pengguna

Kontrol pengguna berarti kontrol penuh terhadap bentuk dan komposisi yang dapat secara signifikan memengaruhi desain kreativitas pangan. Desain antarmuka kontrol pengguna melibatkan tiga fungsi: 1) menyediakan alat pada desain bentuk dan pemilihan bahan untuk desain bagian pangan yang dikustomisasi, 2) mengubah desain ini menjadi model 3D yang terkomputerisasi, dan 3) merencanakan jalur pengeluaran dan memproses parameter terkait. Dengan demikian, mengembangkan antarmuka pengguna yang interaktif dan mampu menghubungkan dengan perpustakaan template berbasis akses web terbuka sangat penting (Lipton dkk., 2010).

Dengan antarmuka seperti itu, konsumen dapat mendesain potongan pangan mereka sendiri, mendapatkan file desain secara online melalui penyedia layanan teknologi, atau berbagi desain dengan pengguna lain. Produk kemudian dapat dibangun di depan konsumen menggunakan printer pangan 3D personal dalam konteks baru pembuatan produk rumah tangga, yang tidak mungkin dicapai berdasarkan metode yang ada.

3. Bahan Pencetakan (Bahan Pangan) yang Tersedia

Upaya substansial telah dilakukan untuk bahan praproses yang cocok untuk pencetakan 3D dan meningkatkan stabilitas termal selama pasca-pemrosesan. Mencetak pangan dalam bentuk bubur yang diusulkan oleh TNO dapat membantu orang tua dengan masalah mengunyah dan menelan (Gray dkk., 2010). TNO juga menyarankan untuk mencetak pangan khusus untuk manula, atlet, ibu hamil melalui berbagai tingkat komponen pangan seperti protein dan lemak. Secara umum, bahan cetak yang tersedia dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori berdasarkan kemampuan cetak.

a. Bahan Pangan Asli yang Dapat Dicitak

Bahan asli yang dapat dicetak seperti hidrogel, kue frosting, keju, hummus, dan cokelat dapat diekstrusi dengan lancar dari jarum suntik. Campuran gula, pati, dan kentang tumbuk diuji sebagai bahan bubuk pada printer 3D Z Corporation (Walters dkk., 2011). Beberapa pangan tradisional diuji untuk studi ketercetakan menggunakan Fabaroni (Sun dkk., 2015). Bahan yang paling sukses diuji adalah adonan pasta, dinilai dari viskositas, konsistensi, dan sifat pemadatan. Produk pangan yang dibuat dengan bahan yang dapat dicetak secara asli dapat dikontrol sepenuhnya pada rasa, nilai gizi, dan tekstur. Beberapa bahan yang dapat dicetak secara asli cukup stabil untuk menahan bentuk setelah pengendapan sehingga tidak memerlukan pasca-pemrosesan lebih lanjut dan dapat dicadangkan untuk aplikasi medis dan ruang angkasa. Formulasi komposit lain seperti adonan dan pasta protein mungkin memerlukan proses pemasakan pasca-pengendapan. Hal tersebut akan membuat struktur produk pangan lebih sulit untuk mempertahankan bentuknya (Lipton dkk., 2010).

b. Bahan Pangan Tradisional yang Tidak Dapat Dicitak

Pangan seperti nasi, daging, buah, dan sayur yang banyak dikonsumsi masyarakat setiap hari tidak bisa dicetak oleh mesin. Untuk mengaktifkan kemampuan ekstrusinya, diperlukan penambahan hidrokoloid dalam bahan padat. Hal ini telah disetujui dan digunakan di banyak bidang kuliner. Lipton dkk. (2010) menggunakan aditif sederhana untuk memodifikasi resep pangan tradisional dan menciptakan geometri kompleks serta formulasi baru. Meskipun pangan padat dan cairan semipadat telah dimanipulasi agar dapat dicetak dengan trik gastronomi, sulit untuk menguji dan memodifikasi seluruh daftar pangan tersebut. Salah satu solusi potensial adalah menggunakan sekelompok kecil bahan untuk membuat platform dengan banyak derajat kebebasan pada tekstur dan rasa. Dengan menyesuaikan konsentrasi hidrokoloid, rentang tekstur yang sangat luas (rasa di mulut) dapat dicapai. Cohen dkk. (2009) melakukan eksperimen tekstur

pangan menggunakan dua sistem hidrokoloid dan mengeksplorasi persyaratan struktural untuk bahan pasca-pemrosesan seperti pasta protein dan campuran kue.

c. Pasca-pengolahan

Proses pencetakan pangan tidak memerlukan sumber energi yang tinggi untuk benar-benar menghilangkan bahan cair dari komposisi pangan. Lapisan fabrikasi tidak perlu dipadatkan sepenuhnya, tetapi memiliki kekakuan dan kekuatan yang cukup untuk menopang beratnya sendiri dan berat lapisan berikutnya tanpa deformasi atau perubahan bentuk yang signifikan.

Sebagian besar pangan tradisional memerlukan pemasakan pasca-pengendapan setelah dibentuk, seperti memanggang, mengukus, atau menggoreng. Proses ini melibatkan tingkat penetrasi panas yang berbeda dan menghasilkan tekstur yang tidak homogen. Geometri internal kompleks yang dicetak menggunakan resep kue dengan bahan modifikasi kakao dapat mempertahankan bentuknya setelah proses pemanggangan.

B. Teknologi 3DP dalam Pencetakan Pangan

Pencetakan pangan 3D memiliki keunggulan signifikan dalam fabrikasi pangan bernilai tinggi dan volume rendah, terutama untuk item yang disesuaikan dalam layanan pangan. Beragam desain kepala cetak diterapkan untuk memuat dan mencetak bahan pangan. Beberapa menggunakan energi panas dari laser pemanas untuk sinter atau bubuk leleh, sedangkan yang lain menggunakan kepala cetak tipe inkjet untuk menyemprotkan pengikat atau pelarut secara akurat. Di bawah ini adalah ringkasan teknologi 3DP yang bisa diaplikasikan.

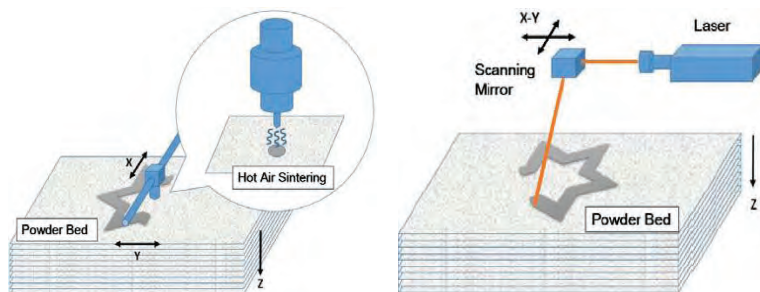
1. Teknologi Sintering Selektif

Sintering merupakan suatu proses untuk mengembangkan objek 3D dalam waktu singkat terutama menggunakan material berbahan

dasar serbuk. Dalam *selective laser sintering* (SLS) dan *hot air sintering* (HAS), model 3D ditentukan oleh perangkat lunak 3D dan laser inframerah akan diarahkan ke pemindai, memantulkan sinar laser pada alas printer yang berisi bahan bubuk, sehingga membangun struktur padat dengan sinterisasi. Laser bertindak sebagai sumber panas yang secara selektif memadukan bahan bubuk dengan memindai dalam gerakan penampang yang ditentukan dari deskripsi digital 3D yang dikodekan oleh perangkat lunak 3D. Untuk membuat objek 3D, lapisan serbuk diturunkan satu lapis ketebalan setelah lapisan pertama penampang dipindai saat lapisan serbuk baru diterapkan di atas lapisan pertama. Proses sintering diulang sampai objek 3D selesai. SLS dapat diterapkan untuk membangun beberapa lapisan yang berisi substrat pangan yang berbeda di setiap lapisan.

Mesin SLS dapat menggunakan bubuk komponen tunggal, misalnya untuk sintering laser logam langsung. Dalam mesin SLS bubuk komponen tunggal, laser hanya melelehkan permukaan luar partikel yang dikenal sebagai peleburan permukaan. Proses ini akan menggabungkan inti padat yang tidak meleleh satu sama lain dan ke lapisan sebelumnya untuk membuat objek 3D (Periard dkk., 2007).

Gula dan serbuk kaya gula dapat disinter secara selektif untuk menghasilkan bentuk kompleks. Setelah lapisan serbuk baru disebar-kan, sumber sintering (udara panas pada Gambar 12.2 (kiri) atau laser pada Gambar 12.2 (kanan)) akan bergerak sepanjang sumbu X dan Y untuk melebur partikel serbuk sehingga dapat saling mengikat dan membentuk lapisan padat. Proses ini diulangi terus menerus hingga menutupi permukaan yang menyatu dengan lapisan baru partikel material sampai menyelesaikan objek 3D. *Food Jetting Print* TNO menerapkan laser pada gula sinter dan bubuk NesQuik. Bahan yang disinter membentuk bagian, sementara bubuk yang tidak disinter tetap di tempatnya untuk mendukung struktur yang dapat didaur ulang. CandyFab menerapkan aliran udara panas berkecepatan rendah selektif untuk sinter dan melelehkan lapisan gula. Alas bubuk fabrikasi (*powder bed*) dipanaskan tepat di bawah titik leleh material untuk meminimalkan distorsi termal dan memfasilitasi fusi ke



Sumber: Sun dkk. (2015)

Gambar 12.2 *Selective Laser Sintering* (kiri) dan *Selective Hot Air Sintering* (kanan)

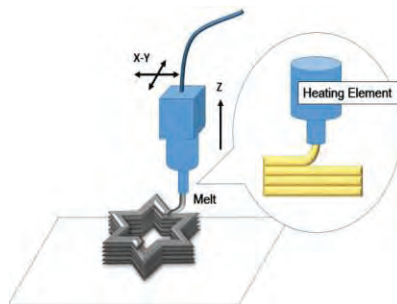
lapisan sebelumnya. Sintering selektif menawarkan kebebasan untuk membuat pangan kompleks dengan cepat dalam waktu singkat tanpa *post curing*. Teknologi ini cocok untuk bahan berbasis gula dan lemak dengan titik leleh yang relatif rendah. Namun, operasi fabrikasi rumit karena banyak variabel yang terlibat.

Pertama kali dijelaskan dalam karya Crump dkk. (1991), ekstrusi lelehan panas juga disebut sebagai *fused deposition modeling* (FDM). Pada Gambar 12.3, bahan termoplastik semi-padat meleleh diekstrusi dari kepala FDM kemudian disimpan ke substrat. Bahan dipanaskan sedikit di atas titik lelehnya sehingga segera mengeras setelah diekstrusi dan digabung ke lapisan sebelumnya.

Dalam pencetakan pangan, ekstrusi lelehan panas diterapkan untuk membuat produk cokelat 3D yang dikustomisasi. Hao dkk. (2010) membandingkan sifat material antara berbagai bahan pangan dan produk coklat 3D yang dicetak dengan bentuk dan ukuran yang berbeda. Peneliti MIT menggunakan cokelat leleh panas sebagai cairan pengeluaran dan mengembangkan prototipe fungsional bernama “cokelat digital” untuk membuat permen cokelat yang dikustomisasi (Zoran dkk., 2011). Dalam penelitian ini, udara terkompresi diterapkan untuk melelehkan cokelat dan memaksanya keluar. ‘3D Food-Inks Printer’ dengan gambar warna 3D yang disematkan pada

bahan dasar yang diekstrusi juga dapat termasuk dalam kategori ini, sementara langkah memasak pascadeposisi diperlukan untuk menyatukan lapisan.

Printer pangan yang dirancang berdasarkan ekstrusi lelehan panas memiliki ukuran yang ringkas, dan biaya perawatan yang rendah. Kekurangan seperti garis jahitan antar lapisan, waktu fabrikasi yang lama, dan delaminasi yang disebabkan oleh fluktuasi suhu perlu diteliti lebih lanjut.



Sumber: Sun dkk. (2015)

Gambar 12.3 Hot Melt Extrusion (FDM)

2. Binder Jetting

Dalam teknologi *binder jetting*²³ standar, setiap lapisan serbuk didistribusikan secara merata di seluruh platform fabrikasi dan pengikat cair disemprotkan untuk mengikat dua lapisan serbuk berurutan. Bahan bubuk biasanya distabilkan melalui kabut air untuk meminimalkan gangguan yang disebabkan oleh pengeluaran pengikat. Dalam proyek pencetakan 3D yang dapat dimakan, Walters dkk. (2011) menggunakan gula dan campuran pati sebagai bahan bubuk dan printer 3D

²³ *Binder Jetting* adalah proses manufaktur aditif di mana kepala cetak secara selektif menyimpan zat pengikat cair ke lapisan tipis partikel bubuk—baik logam, pasir, keramik, maupun komposit—untuk membangun suku cadang dan peralatan bernilai tinggi dan unik.

bubuk sebagai platform untuk membuat bentuk yang disesuaikan dengan struktur kompleks. Sugar Lab menggunakan gula dan pengikat rasa yang berbeda untuk membuat kue pahatan kompleks untuk pernikahan dan acara khusus lainnya. Fabrikasi ini mengadopsi teknologi Color Jet Printing dari Sistem 3D dan bahan serta proses fabrikasi yang memenuhi semua persyaratan keamanan pangan. Pengaliran pengikat menawarkan keuntungan seperti fabrikasi yang lebih cepat dan biaya bahan yang rendah, tetapi memiliki permukaan akhir yang kasar dan biaya mesin yang tinggi. Pasca-pengolahan mungkin diperlukan, seperti pengawetan pada suhu yang lebih tinggi untuk lebih memperkuat ikatan.

3. Pencetakan Inkjet

Pencetakan pangan inkjet mengeluarkan aliran/tetesannya dari kepala cetak tipe jarum suntik dengan cara *drop-on-demand*²⁴. Produk pangan 3D yang dapat dimakan seperti kue kering dibuat dalam struktur lapisan yang melibatkan pola pangan pada beberapa lapisan pemrosesan. FoodJet Printer De Grod Innovations menggunakan jet nosel membran pneumatik untuk menyimpan bahan yang dipilih jatuh ke dasar pizza, biskuit, dan *pancake*. Aliran/tetesannya yang dikeluarkan jatuh berdampak pada substrat dan mengering melalui penguapan pelarut. Tetesan dapat membentuk gambar digital sebagai hiasan atau mengisi permukaan.

Dibandingkan dengan fabrikasi pangan yang disesuaikan secara manual, pencetakan pangan 3D tidak memerlukan pengaturan yang mahal sehingga ekonomis dalam produksi dengan jumlah kecil. Kualitas bahan pangan fabrikasi tergantung pada proses dan perencanaan daripada keterampilan orang. Dengan demikian, fabrikasi dapat dikontrol dengan mudah dan akurat berdasarkan permintaan konsumen. Ini memainkan peran yang semakin penting dalam pengolahan pangan sebagai teknologi pelengkap. Tabel 12.2 adalah

²⁴ *Drop On Demand* adalah proses pencetakan 3D di mana tetesan material secara selektif disimpan dan diaplikasikan pada media. Menggunakan *photopolymers* atau tetesan lilin yang leleh saat terkena cahaya, objek dicetak satu lapis pada satu waktu.

ringkasan aplikasi teknik 3DP saat ini dalam pencetakan pangan dengan perbandingan bahan yang berlaku, platform fabrikasi, dan produk.

Tabel 12.2 Perbandingan Teknologi 3DP dalam Pencetakan Makanan

	Hot-melt extrusion	Teknologi sintering	Pencetakan bubuk inkjet	Pencetakan inkjet
Bahan	Polimer makanan seperti coklat	<i>Melting powder</i> seperti gula, NesQuik atau lemak.	Bubuk seperti gula, pati, tepung jagung, perasa, dan pengikat cair.	Bahan dengan viskositas rendah seperti pasta atau puree.
Platform	a) Stage bermotor b) Unit pemanas c) Perangkat ekstrusi	a) Stage bermotor b) Sumber sintering (laser atau udara panas) c) Alas untuk serbuk	a) Stage bermotor b) Alas untuk serbuk c) Kepala cetak inkjet untuk pencetakan binder	a) Stage bermotor b) Kepala cetak inkjet c) Unit kontrol termal
Produk olahan	Cokelat yang dikustomisasi	Objek seni berupa pangan, bentuk permen	Gula batu berwarna-warni	Kue yang dikustomisasi, pembentukan pasta makanan
Mesin	Choc Creator	Food Jetting Printer	Chefjet	Foodjet
Perusahaan	Chocedge	TNO	3D systems	De Grood Innovations

Sumber: Sun dkk. (2015)

C. Multi Bahan dan Multi Kepala Cetak

Menerapkan banyak bahan cukup umum dalam desain dan fabrikasi pangan yang dikustomisasi. Beberapa dari bahan-bahan ini berasal dari resep pangan tradisional, sedangkan aditif dan lainnya adalah bahan non-tradisional yang dapat dimakan, terutama non-pangan seperti bahan yang diekstraksi dari ganggang atau bahkan serangga. Dalam proyek ‘Insects Au Gratin’, bubuk serangga dicampur dengan

lapisan gula yang dapat diekstrusi dan keju lunak untuk membentuk struktur pangan dan membuat potongan yang lezat (Walters dkk., 2011). Keragaman bahan cetak memberdayakan konsumen untuk mengendalikan desain dan fabrikasi bahan yang berbeda.

Sebagian besar proyek pencetak pangan seperti ChocALM, Insects Au Gratin, dikembangkan menggunakan ekstrusi kepala cetak tunggal untuk satu bahan atau campuran beberapa bahan. Ketika satu kepala cetak digunakan untuk mencetak campuran bahan pangan, kepala cetak tidak mampu mengontrol distribusi atau komposisi bahan di dalam setiap lapisan atau di seluruh struktur. Untuk mencapai pengendapan dan distribusi material yang terkontrol secara *drop-on-demand*, dibutuhkan lebih banyak kepala cetak. Untuk beberapa kepala cetak, data dari lapisan individual diarahkan ke pengontrol platform, baik di platform komersial maupun DIY, yang secara selektif mengaktifkan motor untuk menggerakkan *dispensing head* yang sesuai dan mengontrol laju pengumpanannya. Oleh karena itu, printer pangan dapat memberikan fabrikasi objek multimaterial dengan kompleksitas geometris yang lebih tinggi.

Peneliti mencoba beberapa kepala cetak menggunakan printer Fab@Home 3D untuk menguji *frosting*, cokelat, keju olahan, campuran



Sumber: Sun dkk. (2015)

Gambar 12.4 Desain Makanan Multibahan (atas) dan Sampel Fabrikasi (bawah)

muffin, campuran hidrokoloid, karamel, dan adonan kue. Pencetakan bahan ganda hanya dicapai dengan menggunakan kepala deposisi terpisah untuk kumpulan bahan terbatas, sedangkan bahan sekunder digunakan untuk mendukung fabrikasi (Periard dkk., 2007) yang dapat dilepas setelah itu. Gambar 12.4 menunjukkan beberapa sampel makanan tiga bahan yang dibuat oleh kelompok peneliti di National University of Singapore. Resep dasar biskuit terdiri dari tepung terigu, mentega, gula, dan putih telur.

Multibahan dapat menghasilkan bahan multiskala setelah diproses dan memerlukan teknik fabrikasi yang sesuai. Gray dkk. (2010) mengusulkan penggunaan *electro-spinning* untuk menghasilkan beberapa subkomponen pangan dan merakitnya menjadi struktur komposit multikomponen untuk berbagai bahan. Ini adalah solusi baru untuk membentuk bahan pangan nontradisional menjadi struktur menarik yang dapat dimakan.

D. Dampak Pencetakan Pangan 3D

Printer pangan memperkenalkan kemampuan artistik untuk santapan mewah dan memperluas kemampuan kustomisasi massal ke sektor industri kuliner. Potensi ini menguntungkan proses fabrikasi pangan kustomisasi bernilai tinggi yang masih belum tercapai saat ini. Hal ini juga menyediakan alat penelitian untuk memanipulasi pengembangan struktur bahan pangan padat pada berbagai skala. Teknologi ini masih dalam tahap pengembangan. Oleh karena itu, penting untuk memahami nilai inti dan aplikasi potensialnya di pasar. Pada saat yang sama juga perlu untuk menindaklanjuti kemajuan teknologi dan aplikasi yang relevan untuk menyelidiki bagaimana teknologi baru ini akan memenuhi kebutuhan konsumen dan berpotensi mengubah gaya hidup masyarakat.

1. Desain Pangan yang Dipersonalisasi

Sebagian besar teknik pembuatan pangan dikembangkan untuk produksi massal, sementara kreativitas pangan dan kontrol konsumen pada bentuk, struktur, dan rasa biasanya dikorbankan. Printer pangan

menyediakan platform untuk eksperimen konsumen dengan bentuk dan rasa pangan. Sebelumnya, proses kustomisasi ini melibatkan keterampilan tangan khusus dengan tingkat produksi rendah dan biaya tinggi. Teknologi pencetakan pangan berpotensi mengatasi hambatan ini dengan menawarkan lebih banyak kebebasan dalam desain kustomisasi pangan pada bentuk, warna, dan rasa untuk pengguna rumahan. Teknologi ini dapat menghasilkan lebih banyak solusi desain seperti pembentukan cokelat yang dikustomisasi (Zoran dkk., 2009) dan gambar penuh warna yang dipersonalisasi ke dalam format pangan padat.

Aplikasi teknologi manufaktur aditif yang paling banyak dieksploitasi adalah kustomisasi pangan. Sebagian besar teknologi produksi pangan komersial berfokus pada produksi massal. Kreativitas dan penyesuaian bentuk, struktur, dan rasa terbatas pada produk tertentu dan personel yang terampil. Teknologi pencetakan pangan dapat memungkinkan konsumen untuk bereksperimen dengan persediaan bahan dan membuat berbagai produk pangan baru. Manfaat yang jelas adalah kemampuan untuk membuat bentuk kompleks yang tidak dapat diproduksi dengan menggunakan teknologi lain. Contoh yang menarik adalah karya ekstrusi pasta kacang dan saus Meksiko untuk membuat burrito (Pallottino dkk., 2016). Para peneliti telah membuat pangan seperti pizza dan kue kering menggunakan Foodini™, yakni printer komersial yang menggunakan teknik ekstrusi lelehan panas. Menggunakan pencetakan 3D dapat mengurangi upaya melelahkan dalam pembuatan pangan dan memungkinkan penghematan waktu yang signifikan. Keduanya merupakan keterbatasan dari pendekatan konvensional. Selain struktur pencetakan dengan desain yang rumit dan atribut tekstur yang unik, kita dapat meningkatkan atau memvariasikan profil rasa menggunakan pencetakan 3D. Sebagai contoh, para ilmuwan telah mengembangkan kapsul seperti jeli dengan rasa dan bentuk yang dapat dikustomisasi (M M-H, 2014). Hal ini juga memungkinkan pembuatan produk dengan kandungan fenolik tinggi dan aktivitas antioksidan dari buah-buahan dan campuran sayuran dengan atribut sensorik yang dapat diterima.

2. Nutrisi yang Dipersonalisasi

Di luar preferensi nutrisi yang ada, diet individu telah menyoroti konsep nutrisi pribadi dalam hal status kesehatan individu dan kebutuhan tipe tubuh. Pencetakan pangan dapat memungkinkan kontrol yang tepat dari diet orang dan memastikan hidangan segar dan sehat yang benar-benar memenuhi kebutuhan dan preferensi individu. Ini akan secara signifikan meningkatkan kesejahteraan penduduk. Diperlukan lebih banyak upaya untuk menghadirkan produk pangan yang mampu dikustomisasi ke setiap rumah.

Para peneliti mempertimbangkan kebutuhan diet individu, alergi, atau preferensi rasa di bawah pratinjau nutrisi yang dipersonalisasi. Konsepnya mengacu pada “formula pangan yang dipersonalisasi” dan melibatkan persiapan atau produksi formulasi dengan tingkat nutrisi dan senyawa fungsional yang tepat yang diperlukan untuk mencegah penyakit/melindungi kesehatan. Menggunakan pencetakan 3D, nutrisi atau senyawa fungsional dapat disimpan dalam lapisan tercetak dengan merumuskan pasokan bahan sebagai formula pangan yang dipersonalisasi. Ini dapat membantu dalam memberikan fokus yang lebih baik pada profil nutrisi dengan mengganti bahan-bahan tertentu dengan alternatif yang sehat. Di bawah proyek “Performance” Inovasi Makanan Biozoon menyiapkan kue dari tepung yang diturunkan dari serangga untuk orang yang menderita masalah pengunyahan (Pinna dkk., 2016). Menggunakan pencetak gel yang dapat dimakan, para peneliti juga telah mengembangkan pangan lunak untuk orang tua, sehingga mudah untuk ditelan (Serizawa dkk., 2014). Untuk mengatasi kesulitan menelan, TNO hadir dengan konsep pencetakan bubur pangan untuk membantu lansia yang mengalami masalah mengunyah dan menelan. Pangan yang disesuaikan juga dapat disiapkan dengan komposisi nutrisi khusus usia. Dalam sebuah penelitian yang menarik, para peneliti telah mencetak struktur pangan berbasis sereal yang mengandung probiotik (Zhang dkk., 2018). Contoh-contoh tersebut memberikan dimensi baru pada penelitian pencetakan pangan 3D karena probiotik membentuk komponen kunci dari pasar pangan

nutraceutical dan fungsional dengan signifikansi tinggi bagi kesehatan manusia.

Mengintegrasikan pencetakan dan nutrisi dapat memungkinkan konsumen untuk menghitung dan mengikuti kebutuhan nutrisi dan kalori yang tepat. Asupan nutrisi dapat dipersonalisasi melalui pencetakan pangan dengan dua pendekatan: (1) mengontrol jumlah pangan, dan (2) mengkalibrasi kadar bahan alami/nutrisi selama desain. Pangan fungsional dapat dibuat menggunakan teknik ini dengan meningkatkan/mengganti/memperkaya/menghilangkan konstituen dari pasokan bahan. Perkembangan baru di bidang ini bertujuan untuk memberikan nutrisi melalui mikroenkapsulasi²⁵. Melalui satu atau lebih pendekatan, pencetakan pangan dapat menyediakan cara yang nyaman untuk mendigitalkan kebutuhan nutrisi dan energi manusia. Teknologi ini juga mendorong aplikasi dalam mengembangkan pangan untuk populasi/profil pekerjaan tertentu. Misalnya, kebutuhan nutrisi individu prajurit dapat disesuaikan dan dapat membuat pangan di medan perang (sesuai permintaan). Umur simpan tidak akan menjadi tantangan karena sebagian besar bahan akan diawetkan sebagai bahan baku. Aspek keamanan membuatnya cocok untuk mencetak pangan luar angkasa karena tetap menjadi tantangan bagi teknik konvensional untuk memenuhi persyaratan umur simpan yang lama. Keuntungannya juga dalam hal stabilitas gizi yang sebaliknya bisa menjadi perhatian.

3. Menyederhanakan Rantai Pasok Pangan

Printer pangan akan memfasilitasi penerapan strategi *build-to-order*²⁶ dengan biaya tambahan yang rendah. Menempatkan fasilitas produksi

²⁵ Mikroenkapsulasi didefinisikan sebagai proses di mana partikel kecil atau tetesan bahan aktif dikelilingi oleh lapisan atau tertanam dalam matriks homogen atau heterogen, umumnya bahan polimer, untuk memberikan kapsul kecil yang dapat berkisar dari sub-mikron ke beberapa milimeter dalam ukuran dengan banyak sifat yang berguna.

²⁶ *Build to order supply chain* (BOSC) adalah pendekatan manufaktur yang digerakkan oleh permintaan di mana produk dibuat sesuai dengan kebutuhan pelanggan individu dan harga sangat kompetitif dalam periode waktu yang singkat.

di dekat konsumen akhir merupakan hal yang ekonomis. Hal ini dapat membantu mengonfigurasi ulang rantai pasok pangan yang dikustomisasi dan membawa produk ke konsumen dalam waktu yang lebih singkat, harga yang lebih terjangkau sambil memanfaatkan lebih sedikit sumber daya.

4. Merumuskan kembali Teknologi Pengolahan Pangan

Sebagian besar teknologi pemrosesan pangan yang terkait dengan perubahan kimia dan fisik mungkin tidak sesuai dengan persyaratan teknologi pencetakan 3D. Ini berlaku untuk komposisi, struktur, tekstur, dan rasa. Formulasi bahan dengan kombinasi yang bervariasi dan kondisi manipulasi dapat menghasilkan berbagai tekstur dalam produk yang mungkin melampaui tingkat yang dapat diatur. Selain itu, properti bahan cetak harus kaku dan cukup kuat untuk menopang berat lapisan yang selanjutnya diendapkan serta efek termal dari proses pasca-pemasakan. Secara singkat, teknologi pengolahan pangan konvensional tidak mungkin masuk ke dalam skenario yang rumit dan seluruh proses harus dirumuskan ulang, misalnya saat sebelum melakukan beberapa proses (seperti pembentukan gluten dan ragi) dan saat mengganti proses yang tersisa (membentuk dan memanggang).

5. Desain Proses dan Digitalisasi

Untuk mencapai pemahaman yang lebih baik tentang pencetakan pangan 3D, model matematika yang secara realistis dapat menggambarkan proses ini dengan *input*, *output*, dan jenis proses pada dasarnya akan berguna. Proses fabrikasi pangan yang disesuaikan dan desain printer pangan adalah kekuatan pendorong utama untuk mengembangkan model semacam itu. Parameter proses utama seperti suhu, kelembapan, dan sifat pangan seperti kepadatan, konduktivitas termal dan listrik, viskositas, permeabilitas sering digabungkan. Sangat penting untuk mendigitalkan proses memasak yang komprehensif sebelum manipulasi matematis, yang sangat berbeda dari model

pengolahan pangan tradisional. Data sifat pangan dapat diperoleh dari pengukuran, database terkomputerisasi, buku pegangan, dan perhitungan teoretis. Pada kenyataannya, sifat pangan sering bervariasi dari *batch ke batch* karena perbedaan formulasi, dan lain-lain. Dengan memvariasikan data properti dan geometri di sekitar nilai yang diharapkan dalam model simulasi, seseorang dapat mengelompokkan properti dan memprediksi hasil pemrosesan pangan tertentu untuk suatu rentang properti tertentu. Untuk mengembangkan model simulasi ini, seseorang mengeksplorasi lebih lanjut untuk memodelkan proses pencetakan yang dirancang khusus dengan geometri objek 3D, melakukan kuantifikasi data untuk setiap proses (pengukuran dan pencampuran bahan, pencetakan, pemanggangan dan sebagainya), dan menentukan protokol komunikasi antara fungsi atau proses yang berbeda.

6. Pengemasan Pangan

Aplikasi menarik yang sedang dikembangkan oleh pencetakan 3D adalah kemasan pangan. Dengan konsep *rapid prototyping*²⁷, kita bisa menggunakan *3D printing* untuk mengembangkan prototipe kemasan pangan. Memiliki kemampuan untuk menyesuaikan warna, teks, dan desain, persepsi konsumen tentang kemasan pangan dapat diprediksi jauh sebelum komersialisasi. Selain itu, dengan desain baru dan kreatif, pencetakan 3D dapat memfasilitasi pengujian pasar yang lebih mudah. Konsumen dapat diberikan pilihan untuk memilih inisial/foto yang disukai dan diukir pada paket. Berfokus pada keberlanjutan, penelitian telah membuat cangkir *biodegradable* yang dikemas dengan bahan minuman energi. Konsumen hanya perlu menambahkan air untuk menyiapkan minuman energi. Dengan logika ini, hasil dari penelitian tersebut dapat diperluas ke jenis kemasan lainnya. Biaya lima cangkir pintar yang dicetak 3D adalah sekitar US\$ 12 menjelaskan bahwa tantangan di masa depan adalah mengurangi biaya. Ini juga

²⁷ *Prototyping* cepat adalah fabrikasi cepat dari bagian fisik, model atau perakitan menggunakan 3D Computer Aided Design (CAD). Pembuatan part, model atau perakitan biasanya diselesaikan dengan menggunakan *additive manufacturing*, atau lebih dikenal dengan 3D printing.

menyiratkan bahwa manufaktur aditif dapat mempromosikan penggunaan kembali limbah plastik dan penggunaan biopolimer untuk aplikasi pengemasan pangan. Meskipun harga merupakan kendala, pencetakan 3D dapat membuat paket pangan yang dikustomisasi. Industri pangan terkemuka sekarang fokus pada eksperimen aplikasi manufaktur aditif terbaik untuk pengemasan pangan dalam prototipe paket cerdas.

Teknologi pencetakan 3D juga digunakan untuk mengembangkan bagian-bagian mesin untuk lini pengemasan, contohnya pada robot *pick and place*. Inovasi tersebut mengurangi waktu dan sumber daya yang dibutuhkan untuk melakukan *outsourcing* desain dan operasi fabrikasi.

E. Tantangan dalam Pencetakan Pangan 3D

Meskipun teknologi manufaktur aditif menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan proses manufaktur konvensional, keterbatasannya tidak dapat diabaikan. Proses pencetakan tergantung pada operasi dan bukan pada keterampilan operator. Oleh karena itu, ada beberapa parameter yang perlu dioptimalkan untuk pencetakan pangan 3D. Hal ini termasuk kekuatan mekanik, formulasi bahan, dan pemilihan bahan pangan yang sesuai. Proses fabrikasi tergantung pada suhu lingkungan, ukuran dan diameter nozzle, laju aliran pasokan material, laju deposisi, dan resolusi. Pencampuran bahan yang tidak tepat dalam pasokan bahan, stabilitas pasokan bahan selama proses pencetakan, dan variabel pascacetak menjadi perhatian.

Pembajakan resep digital akan menjadi tantangan seiring dengan berkembangnya teknologi dan aplikasinya. Manufaktur aditif berpotensi mendisrupsi seperti komputer dan internet. Kebutuhan akan kebijakan baru mengenai hak kekayaan intelektual dan pembajakan tidak dapat diabaikan. Terdapat risiko dalam lingkungan manufaktur aditif dan potensinya untuk muncul sebagai tantangan keamanan di berbagai tingkat rantai pasok manufaktur aditif. Identifikasi cacat pada objek cetak 3D perlu menjadi teknologi pelengkap sehingga

strategi untuk evaluasi kualitas harus dikembangkan, misalnya sistem visi mesin dapat digunakan untuk aplikasi semacam itu.

Faktor pembatas utama untuk komersialisasi pencetakan 3D di industri pangan adalah kecepatan pencetakan. Kapasitas rendah menjadikannya tantangan untuk produksi massal. Bahkan dalam pemrosesan pencetakan satu unit, proses manufaktur aditif rata-rata akan menghasilkan 1,5-in. kubus dalam waktu sekitar satu jam (Severini dkk., 2016). Selanjutnya, umur simpan pangan cetak yang pendek. Misalnya pada adonan yang digunakan dalam printer 3D hanya stabil selama 1-2 jam setelah produksi karena perubahan perilaku reologi. Keamanan akan menjadi perhatian lain dalam produksi massal. Sampai saat ini belum tersedia printer skala industri, sebab pengembangan printer semacam itu dengan biaya rendah, keandalan tinggi, dan dengan kemampuan produksi yang cepat tetap menjadi tantangan. Oropallo & Piegl (2016) melaporkan perspektif yang diuraikan dengan baik tentang tantangan yang terkait dengan teknologi pencetakan 3D dan menyoroti kebutuhan untuk penelitian yang luas.

F. Sikap Konsumen terhadap Pencetakan 3D

Dengan tuntutan untuk penyesuaian skala besar dan peningkatan kenyamanan yang disediakan oleh teknologi pencetakan 3D dalam hal daya tarik estetika dan profil nutrisi yang disesuaikan, pasar pencetakan pangan 3D tumbuh dengan pesat. Jaminan kualitas yang ketat dan kontrol nutrisi yang tepat dicapai dengan menggunakan pencetakan 3D. Aspek lain yang mendorong pertumbuhan sektor ini termasuk keramahan lingkungan dan keberlanjutan teknologi dalam jangka panjang. Penggunaan bahan baku dan kebutuhan energi yang lebih rendah berdampak pada pengurangan jejak ekologis. Dengan menggunakan teknologi pencetakan, banyak langkah pemrosesan konvensional dapat digabungkan dan pangan dapat dicetak sesuai permintaan. Hal ini dapat mengurangi timbulnya sampah pangan.

Keberhasilan pangan baru di pasar tergantung pada preferensi konsumen. Beberapa peneliti telah membahas banyak keterbatasan

teknologi, tetapi hanya sedikit proses pemikiran yang dilakukan tentang bagaimana konsumen memandang pangan cetak 3D. Brunner dkk. (2018) menganalisis penerimaan konsumen terhadap pangan cetak 3D. Namun, banyak juga konsumen yang skeptis terhadap pangan cetak 3D dan mempertanyakan apakah pangan tersebut aman untuk dikonsumsi, apakah nutrisinya bisa berkurang, atau apakah akan memiliki efek samping. Dampak positif dalam hal komposisi nutrisi yang dipersonalisasi dan kemungkinan untuk membantu mengurangi limbah pangan adalah alasan utama konsumen menyukai pangan cetak 3D. Para peneliti ini melakukan survei konsumen dengan kuesioner tentang pengetahuan sebelumnya tentang pangan cetak, manfaat kesehatan, kenyamanan, nutrisi yang disesuaikan, keinginan untuk mengonsumsi, daya tarik produk, kemungkinan kreativitas, dan parameter sosiodemografi lainnya. Mereka melaporkan bahwa orang memiliki pengetahuan dan pengalaman yang terbatas tentang pangan cetak, karena pencetakan 3D adalah teknik baru dan belum menjangkau pasar ke tingkat seperti yang dimiliki produk pangan konvensional. Kuesioner membantu konsumen untuk mengetahui tentang manfaat pangan cetak 3D dan dalam mengatasi neofobia pangan. Bahkan, ketakutan dan keengganan yang menahan konsumen untuk menerima pangan cetak kini menjadi landasan untuk memahami opini konsumen terhadap pangan cetak. Aspek penting ini harus dipertimbangkan selama pembuatan dan pemasaran pangan cetak 3D.



BAB 13

Menyambut Masa Depan Pasokan Pangan Dunia

A. Industri 4.0 dan Keberlanjutan

1. Peluang Kontribusi Akademis

Berbagai literatur saat ini telah menyoroti pentingnya menghubungkan konsep Industri 4.0 dan keberlanjutan. Dua bidang tersebut memengaruhi bisnis, teknologi, masyarakat, dan lingkungan alam. Industri 4.0 kemungkinan akan memainkan peran kunci dalam memajukan pembangunan berkelanjutan; atau bahkan berpotensi menghambat disertai konsekuensi yang tidak diinginkan. Teknologi Industri 4.0 dapat membantu peningkatan kinerja keberlanjutan sehingga dapat berharga bagi para manajer perusahaan yang berorientasi pada keberlanjutan untuk mengadopsi teknologi Industri 4.0. Tantangan utama bagi perusahaan adalah untuk mengetahui bagaimana mengadopsi teknologi Industri 4.0 dan bagaimana mengambil manfaat dalam kaitannya dengan keberlanjutan. Industri 4.0 didasarkan pada seperangkat teknologi mendasar sehingga penting untuk menyadari

variabel yang menghubungkan teknologi tunggal dengan praktik dan kinerja keberlanjutan.

Industri 4.0 memiliki banyak manfaat, seperti pembentukan produksi dan proses produksi yang cerdas. Namun, selain bermanfaat, ada efek negatif tertentu yang secara signifikan dapat berdampak pada keberlanjutan rantai pasok. Hal ini semakin memotivasi para akademisi untuk melanjutkan studi ini. Faktor kuncinya adalah dukungan pemerintah; dukungan lembaga penelitian dan universitas; hukum dan kebijakan tentang ketenagakerjaan; peningkatan keamanan dan standar TI; komitmen manajemen; fokus pada modal manusia; manajemen perubahan; integrasi horisontal; integrasi vertikal; standarisasi dan arsitektur referensi; serta tata kelola perusahaan dan audit pihak ketiga.

Dalam bidang akademis, terdapat satu topik penting dan subjek yang menjanjikan untuk penelitian masa depan, yaitu tentang definisi Industri 4.0 dengan konsep dan teknologi, serta kontribusi masing-masing terhadap aspek ekologi, sosial, dan ekonomi (*triple bottom line*, TBL). Karena berbagai inisiatif di seluruh dunia dan interpretasinya yang berbeda, konsep dan teknologi yang membentuk Industri 4.0 bervariasi. Hal ini akan menjadi kepentingan akademisi untuk mengevaluasi inisiatif ini untuk menemukan kesamaan dan memberikan pemahaman umum tentang Industri 4.0. Misalnya, istilah “Industri 4.0” semakin banyak digunakan di luar lingkungan manufaktur, termasuk dalam disiplin ilmu seperti manajemen inovasi, pengembangan masyarakat, dan kesehatan. Meskipun disiplin ilmu ini mungkin tidak sepenuhnya sesuai dengan konsep Industri 4.0 yang awalnya diusulkan oleh Kagermann dkk. (2013), interaksi industri manufaktur dapat mewakili jalan yang menarik untuk penelitian masa depan. Ini juga terkait dengan beberapa teknologi, seperti platform digital, yang sejauh ini jarang dianalisis dengan perspektif TBL, serta teknologi seperti blockchain, pencetakan 3D, IoT, dan kecerdasan buatan dalam interaksinya di seluruh rantai pasok.

Kedua, topik lain yang harus dievaluasi lebih lanjut adalah penekanan kuat pada lingkungan manufaktur. Pengalihan dan adopsi

konsep Industri 4.0, khususnya teknologi terkait logistik atau manajemen rantai pasok, perlu dikaji lebih lanjut dalam konteks TBL. Terutama rantai pasok terbalik dan proses daur ulang jauh lebih sedikit diselidiki dalam konteks ini. Interkoneksi horizontal dan vertikal sebagai fitur utama Industri 4.0 harus lebih terintegrasi dalam disiplin penelitian manajemen rantai pasok, terutama dari perspektif TBL. Banyak pendekatan dan konsep konkret tentang bagaimana Industri 4.0 akan memanfaatkan potensi teoretis di masa depan disajikan dan dielaborasi.

Ketiga, kurangnya penelitian mengenai dimensi lingkungan dan sosial dari keberlanjutan di lingkungan Industri 4.0. Tidak hanya luasnya pendekatan dan konsep yang menawarkan potensi besar untuk penelitian lebih lanjut, tetapi deskripsi yang mendalam dan konkret tentang bagaimana Industri 4.0 akan berkontribusi pada dimensi lingkungan dan sosial juga akan sangat menarik. Beberapa publikasi terutama membahas peluang dan potensi yang terkait dengan dimensi ekonomi keberlanjutan. Dimensi ekonomi telah diselidiki jauh lebih luas daripada dimensi lingkungan dan sosial, dan penelitian ke dalam dimensi lingkungan dan sosial sering kali berfokus pada subjek yang jauh lebih sedikit. Selanjutnya, interaksi antara dimensi ekonomi dengan aspek ekologi dan sosial, seperti model bisnis terhadap manfaat lingkungan, jarang dipelajari.

Keempat, UKM perlu diintegrasikan ke dalam konsep Industri 4.0 dengan lebih baik untuk membukanya di seluruh rantai pasokan. Namun, UKM jarang dianggap dari perspektif TBL terkait dengan Industri 4.0. Oleh karena itu, UKM juga harus terintegrasi dan siap untuk berbagi data di seluruh rantai pasok. Hal ini melibatkan kemampuan teknis dan mengatasi kekhawatiran tentang tingkat transparansi yang terlalu tinggi untuk konsumen dengan daya tawar yang lebih besar yang mungkin menghambat implementasi Industri 4.0 di UKM.

Kelima, terdapat *blind spot* lain terkait perspektif pemerintah, makroekonomi, dan publik terhadap potensi Industri 4.0 dari perspektif TBL. Penggabungan lebih lanjut dari perspektif dan peran

pemerintah serta lembaga publik akan menjadi bidang yang menarik untuk studi masa depan. Akibatnya, intervensi potensial, seperti peraturan lingkungan atau subsidi untuk UKM, dapat dievaluasi dan digunakan secara efektif untuk perbincangan politik tentang Industri 4.0 dan keberlanjutan.

Terakhir, interaksi antara fondasi dan potensi teknologi dalam TBL keberlanjutan harus lebih dipahami terkait dengan Industri 4.0, mengurangi fokus pada dimensi tunggal TBL yang dianggap terisolasi. Dengan demikian, beberapa topik penting untuk penelitian masa depan termasuk ketersediaan data yang memadai, standar yang berbeda dalam rantai nilai yang berbeda di mana pemasok mungkin aktif, pertanyaan tentang keamanan data dan kepemilikan data, penyimpanan dan ketersediaan data yang terdesentralisasi sambil menjaga dampak ekonomi dan ekologi serendah mungkin. Memunculkan kecanggihan teknologi, digitalisasi, dan berbagi data banyak diselidiki, namun jika kita terbatas pada aspek ini, gerak kita akan sangat terbatas. Sebaliknya, mempertimbangkan pendekatan yang masuk akal di seluruh rantai pasok yang menguntungkan semua mitra dan memungkinkan sinergi, serta menerapkan langkah-langkah yang digunakan di seluruh rantai pasok, akan sangat membantu. Selanjutnya, tantangan untuk mengukur, mengukur, dan mengontrol nilai ekologi dan sosial yang dihasilkan harus juga harus diupayakan.

2. Manfaat Manajerial

Dalam perspektif manajerial, kita telah mendapat gambaran tentang potensi yang terkait dengan Industri 4.0 mengenai TBL. Selain itu, penting untuk memahami beberapa aspek secara lebih rinci. Misalnya, implementasi dan pemahaman Industri 4.0 di seluruh rantai pasok membutuhkan pola pikir baru terhadap konsep tersebut. Di antara isu-isu lain, integrasi UKM yang diperlukan, perluasan Industri 4.0 dari lingkungan manufaktur ke proses logistik dan SCM, serta berbagi informasi dengan konsumen dan pemasok langsung adalah beberapa poin sentral yang perlu dipahami lebih baik dari perspektif manajerial. Selanjutnya, interaksi antara kemungkinan teknologi, alasan ekonomi,

dan potensi ekologis dan sosial di seluruh rantai pasok harus menghasilkan langkah-langkah implementasi yang jelas dan selaras dengan pemasok, konsumen, dan mitra.

Di sisi lain, karena Industri 4.0 juga dapat memiliki dampak negatif yang signifikan, manajer harus memantau dengan cermat potensi masalah ini selama implementasi dan pengelolaan Industri 4.0. Akhirnya, manajer harus menyadari faktor-faktor yang memoderasi hubungan antara Industri 4.0 dan keberlanjutan, seperti kesiapan teknologi, komitmen manajemen, kesiapan organisasi, pelatihan untuk karyawan, dan keterlibatan semua pemangku kepentingan. Saat menerapkan Industri 4.0, mungkin berguna bagi manajer untuk memahami bahwa teknologi dapat memengaruhi keberlanjutan di berbagai dimensi, yaitu ekologi, sosial, dan ekonomi. Peningkatan kesadaran akan isu-isu, membutuhkan tidak hanya pertimbangan pembangunan untuk hasil yang lebih cerdas dan ekonomis, tetapi juga proses yang lebih berkelanjutan secara sosial dan lingkungan.

Sebagai titik sentral, penting untuk menganggap potensi yang disajikan sebagai peluang muncul di seluruh rantai pasok, bukan dalam satu solusi terkait Industri 4.0 di satu perusahaan atau pabrik pintar. Oleh karena itu, peluncuran Industri 4.0 di seluruh rantai pasok, memahami konsep dari fitur-fitur utamanya, interkoneksi horizontal dan vertikal, diperlukan untuk memaksimalkan potensi. Sementara itu, produksi dan operasi mungkin sudah dioptimalkan, seluruh rantai pasok mungkin masih menawarkan banyak potensi yang, bagaimanapun, hanya dapat dioptimalkan oleh beberapa pemangku kepentingan dalam rantai pasok.

Lebih jauh, penting untuk mempertimbangkan potensi lingkungan dan sosial sebagai lebih dari sekadar produk sampingan dari manfaat ekonomi, sambil menyadari model bisnis yang mengomersialkan keuntungan lingkungan dan sosial. Hal ini diperlukan untuk sepenuhnya merasakan potensi Industri 4.0. Demikian pula, kemunculan potensi terkait dengan status implementasi Industri 4.0 dan interaksi tiga dimensi TBL, perlu dipahami lebih baik. Hal ini termasuk, di antara aspek-aspek lebih lanjut, penyertaan model bisnis

di seluruh rantai pasok yang mencakup pengukuran dan penilaian manfaat lingkungan dan sosial yang diciptakan.

B. Kolaborasi Antarteknologi

Mulai dari teknologi Industri 4.0 dan konsep keberlanjutan, kita mengenali serangkaian solusi digital yang dapat mendukung penerapan mekanisme pemrosesan informasi yang diperlukan untuk rantai pasok pangan yang efektif, terdiri dari IoT, *blockchain*, *Big Data*, dan kecerdasan buatan. Aplikasi teknologi produksi digunakan untuk mendukung keterbukaan informasi produk dan menjamin kualitas, serta keaslian pangan, seperti kemasan pintar, teknologi anti-pemalsuan, dan printer pangan 3 dimensi. Begitu juga potensi teknologi canggih untuk mendukung proses pengiriman produk pangan langsung pada konsumen akhir, seperti penggunaan *drone*, robotika, dan sistem otonom (RAS). Kedua, kita membahas bentuk penerapan garis besar dari tren tingkat teknologi dan organisasi yang mencirikan rangkaian teknologi yang telah dibahas sehingga menyoroti dinamika inovasi mereka dan dengan cara apa mereka dapat diadopsi untuk rantai pasok pangan.

1. IoT, *Blockchain*, *Big Data*, dan Kecerdasan Buatan

Organisasi secara bertahap bergerak menuju penerapan teknologi digital, dimulai dari potensi IoT untuk meningkatkan hasil. Teknologi ini menjamin prospek yang luas untuk mendapatkan keunggulan kompetitif dan mengatur nada untuk praktik rantai pasok berkelanjutan di masa depan. Industri 4.0 menawarkan respons cepat terhadap permintaan konsumen. Hal ini berguna untuk meningkatkan produktivitas dan memungkinkan para pemangku kepentingan untuk membuat keputusan lebih cepat secara *real time*. Ini tentu membuka jalan untuk mengadopsi model bisnis baru dan meningkatkan proses manufaktur.

Dalam ulasan ini, berbagai aspek IoT, rantai pasok berkelanjutan, dan industri 4.0 telah kita bahas secara rinci. Begitu pun dengan analisis untuk mengetahui tren dan mengeksplorasi potensi peluang IoT yang tersedia di ruang rantai pasok berkelanjutan untuk industri 4.0. Kerangka kerja baru dalam menilai kesiapan SCM untuk pertumbuhan berkelanjutan dalam era industri 4.0 juga telah diusulkan. Model konseptual dirumuskan dari perspektif bisnis, teknologi, pembangunan berkelanjutan, kolaborasi, dan strategi manajemen. Kerangka kerja yang diberikan dapat menjadi landasan untuk bertransformasi menjadi organisasi industri 4.0. Pada penyelesaian transformasi ini, organisasi akan menjadi perusahaan digital yang lengkap. Perusahaan digital akan beroperasi dengan mitra rantai pasok dalam ekosistem digital organisasi.

Di antara mereka, kita bisa menggarisbawahi bahwa beberapa perusahaan (misalnya Amazon, Walmart, dan Kroger) telah mencoba untuk mendigitalkan proses mereka menggunakan teknologi tersebut. Setiap jenis teknologi sangat relevan untuk membangun rantai pasok pangan yang berkelanjutan. Terutama karena mengacu pada sensor dan sistem akuisisi data, IoT penting untuk mengumpulkan data mentah tentang logistik masuk/keluar di seluruh rantai pasok dan interaksi produk-konsumen. Komputasi awan dikhususkan untuk menyimpan data mentah dalam informasi terstruktur. Informasi tersebut dapat diakses oleh dan dipertukarkan antara rantai pasok dan fungsi pemasaran, yang pada gilirannya dapat menggunakan informasi terstruktur sebagai masukan untuk analisis data dan teknik pengambilan keputusan seluruh aktor dalam rantai pasok. Terakhir, analitik mengekstrak pengetahuan yang sebenarnya penting untuk fungsi *big data* pemasaran dan manajemen rantai pasok. Baik informasi terstruktur di *cloud* maupun pengetahuan yang dihasilkan dapat terus dibagikan kepada anggota rantai pasok agar lebih sesuai dengan proses yang berfokus pada penawaran dan permintaan. Secara keseluruhan, aliran informasi/pengetahuan ini harus dilindungi oleh solusi keamanan siber untuk membatasi pencurian data.

Dalam penerapan teknologi *blockchain*, meskipun teknologi ini telah dipuji sebagai solusi yang menjanjikan untuk mengatasi masalah keterlacakan pangan, ada pemahaman yang sangat terbatas tentang karakteristik dan fungsi spesifiknya untuk manajemen keterlacakan pangan, metode pengembangan dan evaluasi untuk implementasinya, serta manfaat dan tantangan yang dihadapi oleh peneliti dan praktisi ketertelusuran pangan. Ulasan kita memberikan tinjauan tentang aplikasi teknologi *blockchain* dalam manajemen keterlacakan berkelanjutan dan memberikan kontribusi teoretis dan praktis yang berharga. Hal ini dilakukan dengan meningkatkan pemahaman dan pengetahuan kita, menyediakan agenda untuk penelitian lebih lanjut, dan memajukan pengembangan dan praktik penelitian pada aplikasi *blockchain* dalam sistem ketertelusuran pangan berkelanjutan. Studi di masa depan dapat mengadaptasi dan mengevaluasi kerangka kerja operasional keterlacakan berbasis *blockchain* dan arsitektur desain. Perhatian khusus harus diberikan pada penyebaran perangkat keras, kemampuan penyimpanan, kecepatan transaksi, dan kinerja keseluruhan sistem keterlacakan pangan berbasis *blockchain*. Penelitian di masa depan juga harus mempertimbangkan bagaimana teknologi *blockchain* dapat diterapkan untuk meningkatkan keberlanjutan berbagai rantai pangan pertanian.

Di sisi lain, potensi disrupsi kecerdasan buatan (AI) saat ini memberikan kebutuhan mendesak akan kerangka kerja dan model yang dapat mendukung pengembangan dan penggunaan teknologi bertenaga AI pada sistem rantai pasok pangan dalam batas-batas yang berkelanjutan dan etis. Pendekatan transdisipliner diperlukan untuk mengembangkan skenario dan visi masa depan yang dapat diseimbangkan di seluruh bidang sosial, ekonomi, dan lingkungan. Upaya penting adalah mengembangkan strategi visi di mana solusi bertenaga AI dikembangkan oleh beragam pemangku kepentingan untuk menentukan potensi dampaknya. Kita dapat mempelajari apa arti etika dalam konteks solusi AI dalam kehidupan nyata yang diterapkan pada area sistem pangan. Penggunaan Poin Leverage dapat memberikan banyak wawasan tentang cara mengevaluasi dengan lebih

baik dampak AI (manfaat, kekurangan, *trade-off*) yang kemudian dapat digunakan sebagai bagian dari solusi sistem pangan berkelanjutan di masa depan. Hubungan sistem, yang didukung oleh AI, mengambil bentuk baru yang sulit diprediksi. Mereka tidak mengikuti jalur linier dan menentang definisi komunitas atau kelompok kepentingan yang kita anggap remeh. Di dalamnya, mereka membawa potensi disruptif yang diperlukan untuk mengubah paradigma produksi dan konsumsi secara signifikan.

2. Kemasan Pintar dan Tindakan AntiPemalsuan

Beralih ke kemasan pintar, nanoteknologi kemungkinan akan memainkan peran penting dalam waktu dekat dengan tetap mempertimbangkan masalah keamanan yang terkait dengan pengemasan. Untuk mengatasi keamanan serta masalah tambahan lainnya, penelitian dan pengembangan di bidang pengemasan aktif dan cerdas tumbuh dengan kecepatan dinamis. Tentunya hal ini bertujuan untuk memberikan alternatif pengemasan yang ramah lingkungan. Hal ini menjadi tantangan dalam merancang bahan kemasan dengan menggunakan pendekatan *reverse engineering*²⁸ berdasarkan kebutuhan produk pangan selain ketersediaan bahan kemasan itu sendiri. Pendekatan yang disebutkan di atas menghasilkan penyesuaian pelepasan zat aktif yang dirangsang/terkontrol. Bidang pengembangan lainnya adalah penggunaan bahan nonmigrasi yang inovatif dalam hal pemrosesan pangan dalam kemasan fungsional. Tren munculnya teknologi pengemasan *biodegradable* dengan peningkatan kualitas dan keamanan juga menghasilkan inovasi pengemasan. Penelitian dan pengembangan dalam menanggapi preferensi konsumen memunculkan teknik pengemasan pangan aktif, cerdas, dan bioaktif yang sepenuhnya inovatif. Teknologi pengemasan inovatif ini berkontribusi pada peningkatan kualitas, keamanan, kelayakan, dan bioaktivitas pangan dari komponen fungsional. Penerapan teknik pengemasan yang baru dan inovatif berkembang secara luas karena dampak kesehatan sehingga

²⁸ *Reverse engineering* adalah proses untuk membongkar dan memeriksa atau menganalisis secara rinci suatu produk untuk menemukan konsep-konsep yang terlibat dalam pembuatan, biasanya untuk menghasilkan produk yang serupa.

keluhan konsumen berkurang. Dalam waktu dekat, pengemasan tradisional akan sepenuhnya digantikan oleh teknik pengemasan pangan yang inovatif karena teknik ini dengan cepat memasuki pasar global.

Berbagai teknologi yang bisa disematkan pada kemasan pintar juga bisa diberdayakan untuk memerangi tindak pemalsuan. Banyak upaya telah diinvestasikan dalam mengembangkan dan menerapkan strategi anti-pemalsuan. Sementara itu, beberapa dari strategi ini, seperti menyesuaikan desain produk dan kemasan untuk membuat replikasi lebih sulit, meningkatkan keamanan rantai pasok, dan mengembangkan program edukasi konsumen yang telah membuahkan hasil. Biasanya program ini berdiri sendiri dan tidak terintegrasi dengan baik ke dalam operasi bisnis standar. Pendekatan yang lebih komprehensif diperlukan jika pertumbuhan masalah pemalsuan ingin dikurangi.

Kita dapat mengusulkan agar perusahaan mengintegrasikan praktik anti-pemalsuan ke dalam rencana kualitas mereka. Hal ini karena sebagian besar perusahaan yang akan menjadi target potensial untuk pemalsuan sudah memiliki rencana kualitas. Rekomendasi ini tidak menuntut sistem manajemen yang sama sekali baru maupun pengeluaran sumber daya yang besar. Namun, hal itu membutuhkan komitmen manajemen puncak dan struktur organisasi yang mendorong kewaspadaan antipemalsuan, serta komitmen sumber daya untuk inisiatif ini. Pengembalian investasi dapat paling efektif diukur dengan metrik, seperti jumlah barang yang disita dan jumlah personel yang dilatih. Dengan menggunakan pendekatan terpadu, hubungan pemangku kepentingan dan rantai pasok diperkuat. Ketika pemalsu menjadi lebih terampil dan operasi mereka menjadi lebih kompleks, pendekatan yang sistematis adalah mengintegrasikan strategi anti-pemalsuan ke dalam sistem manajemen mutu akan menjadi penting. Pemalsuan telah menjadi praktik yang sangat menguntungkan sehingga mengambil tindakan proaktif untuk mencegahnya tidak lagi opsional.

3. *Drone*

Dalam proses pengiriman pangan, *drone* memegang peran penting di masa depan untuk mengantarkan pangan langsung di depan pintu rumah konsumen. Di atas segalanya, perlu ditekankan bahwa layanan pengiriman pangan oleh *drone* adalah teknologi baru yang belum pernah ada sebelumnya. Misalnya, akan lebih baik jika perusahaan jasa pangan mengiklankan bahwa konsumen dapat menggunakan smartphone untuk melihat pangan mereka dalam perjalanan. Selain itu, pengiriman pangan dikenal sebagai pekerjaan yang sangat berbahaya. Faktanya, sekitar 1.500 orang terbunuh atau terluka saat mengantar pesanan setiap tahun di Korea (Asia Economy, 2017). Oleh karena itu, jika perusahaan jasa pangan menekankan bahwa layanan pengiriman pangan *drone* adalah teknologi baru yang dapat mengurangi jumlah korban sehingga konsumen cenderung memiliki sikap yang baik dalam menggunakan layanan tersebut.

Dalam pengiriman pangan oleh *drone*, penting untuk ditekankan bahwa layanan pengiriman ini mengungguli layanan pengiriman saat ini. Bahkan, layanan pesan antar saat ini, seperti sepeda motor atau mobil, terlambat mengantarkan pangan ke konsumen saat lalu lintas padat. Layanan pengiriman pangan *drone* tidak terpengaruh oleh masalah ini karena mereka mengirimkan pangan di udara. Selain itu, layanan pengiriman pangan *drone* memungkinkan konsumen memesan pangan di daerah yang sulit diakses, seperti pegunungan dan lembah sehingga perusahaan jasa pangan perlu menarik aspek ini, yang akan meningkatkan sikap konsumen yang baik terhadap penggunaan layanan tersebut.

Layanan pengiriman pangan *drone* untuk konsumen adalah hal yang menyenangkan. Misalnya, konsumen cenderung menghindari teknologi baru jika mempelajari teknologi baru itu sulit dan memakan waktu. Oleh karena itu, sebaiknya perusahaan layanan pangan perlu menyediakan video-video fun yang memudahkan konsumen menggunakan jasa pengiriman pangan dengan *drone*. Selain itu, konsumen

akan memiliki pengalaman hedonis tingkat tinggi jika perusahaan jasa pangan menggunakan kamera *drone* untuk memberikan pandangan kepada konsumen tentang pangan yang dikirimkan. Dengan demikian, perusahaan jasa pangan perlu menekankan citra positif menggunakan jasa pengiriman pangan *drone* yang dapat mengesankan orang lain. Jasa pengiriman saat ini, seperti sepeda motor dan mobil diketahui menyebabkan pencemaran lingkungan. Di sisi lain, layanan pesan antar pangan *drone* memiliki citra ramah lingkungan karena diooperasikan dengan listrik. Oleh karena itu, perusahaan pangan harus menarik citra ramah lingkungan dari layanan pengiriman pangan *drone*. Dengan demikian, konsumen lebih cenderung menggunakan layanan pengiriman pangan *drone*.

Terakhir, penyakit menular mengubah perilaku individu dan konsumen secara radikal mengubah perilaku mereka dalam hal konsumsi pangan selama pandemi virus corona. Lebih khusus lagi, peran moderasi dari pandemi Covid-19 diidentifikasi dalam hubungan antara sikap dan niat perilaku, dan diharapkan penggunaan *drone* untuk layanan pengiriman pangan akan meningkat selama periode pasca-Covid-19. Faktanya, beberapa pembuat kebijakan baru-baru ini mengizinkan layanan pengiriman pangan *drone* karena kebutuhan pengiriman tanpa kontak yang drastis selama pandemi Covid-19. Oleh karena itu, praktisi di industri pengiriman pangan disarankan untuk mendokumentasikan kasus-kasus terkini mengenai bagaimana *drone* untuk pengiriman pangan berkontribusi untuk menghindari kontak manusia ke manusia selama krisis virus corona. Akumulasi kasus nyata ini kemudian dapat digunakan untuk sepenuhnya mengomersialkan layanan pengiriman pangan berbasis *drone* di masa depan. Artinya, para ahli di bidang industri pengiriman pangan harus menggunakan informasi ini sebagai data pendukung untuk mendamaikan peraturan dengan otoritas terkait untuk mengaktifkan layanan pengiriman pangan berbasis *drone* di lebih banyak tempat.

Orang akan menganggap *drone* sebagai solusi ideal untuk pengiriman pangan tanpa risiko tinggi kontak manusia ke manusia. Oleh karena itu disarankan untuk menekankan operasi layanan pengiriman

berbasis *drone*, yang tanpa kontak. Dengan demikian, peran *drone* di masa pandemi virus corona harus disikapi secara luas di berbagai saluran, termasuk media. Misalnya, opsi baru *drone* dalam layanan pengiriman pangan dapat dipasang dengan citra pahlawan selama Covid-19, dan konsep alat pengiriman tanpa kontak untuk layanan pengiriman pangan. Sementara itu, para profesional harus mampu mengelola berbagai jenis mode pengiriman untuk mengatasi kasus serupa dalam jangka panjang. Dengan kata lain, memiliki beragam mode pengiriman yang tersedia setiap saat akan memungkinkan mereka untuk beralih ke metode pengiriman yang lebih sesuai dalam keadaan darurat dan mengusulkannya kepada konsumen tanpa kekaucauan atau penundaan untuk menemukan solusi alternatif setelah terjadinya sebuah situasi.

4. Robotika dan Sistem Otonom

Robotics and Autonomous System (RAS) atau dikenal juga dengan robotika dan sistem otonom sedang berkembang pesat dan dianggap sebagai teknologi yang menjanjikan. Penerapan RAS dalam rantai pasok pangan meningkatkan manajemen serta kualitas dan efisiensi. Robot memiliki potensi besar dan bermanfaat bagi industri pangan, tetapi para akademisi dan praktisi industri harus maju dengan hati-hati untuk menjamin keamanan pangan. Robot pangan harus dilengkapi dengan sistem sensor yang sesuai sehingga tidak menimbulkan risiko bagi siapa pun yang bersentuhan dengannya. Dengan meningkatnya biaya tenaga kerja dan kekurangan tenaga kerja karena kebijakan politik yang tidak pasti dan peristiwa gangguan, RAS mungkin menjadi salah satu pendekatan untuk membuat pangan lebih terjangkau. Pendekatan yang sederhana, mudah dan dapat diandalkan harus diadopsi untuk menyempurnakan robot sehingga kinerja yang ideal dapat dicapai tanpa masalah. Meskipun beberapa bidang sektor manufaktur pangan akan mendapat manfaat dari perangkat robotik; perangkat robot yang dirancang khusus untuk produksi pangan akan membantu mengurangi waktu dan biaya produksi. Mereka dapat memberikan kontribusi yang besar bagi sektor manufaktur pangan dalam jangka

waktu yang singkat dan karenanya saat ini sedang diupayakan secara luas. Keamanan pangan, kualitas makanan, limbah makanan, efisiensi rantai pasokan, dan analisis rantai pasokan mendapat manfaat dari penerapan RAS dalam rantai pasokan makanan. Namun, kurangnya aplikasi RAS, ketersediaan data, keamanan siber, kemampuan dan keterampilan, dan biaya tinggi menjadi tantangan untuk adopsi RAS.

5. Printer Pangan 3D

Alat pembuat makanan tradisional menggunakan metode desentralisasi untuk memproduksi produk makanan. Mereka membuat item makanan dengan menggunakan alat yang berbeda, melakukan tindakan yang berbeda pada bahan mentah. Di sisi lain, printer makanan 3D bekerja pada metodologi terpusat dan sebagai unit yang berdiri sendiri yang melakukan banyak tindakan pada bahan mentah untuk memasak makanan yang diprogram. Proses pencetakan 3D lebih sederhana dan menghilangkan banyak langkah yang digunakan dalam manufaktur tradisional. Teknologi ini memungkinkan desain produk yang lebih cepat, lebih adaptif, pengurangan biaya, pengujian produk yang lebih cepat, dan banyak lagi. Misalnya, medis kedirgantaraan dan pengecer berhasil menggunakan teknologi pencetakan 3D di bidang pengembangan produk dan alat. Selanjutnya, kemajuannya semakin menjadi relevan dalam industri makanan. Teknologi pencetakan makanan benar-benar inovatif; teknologi ini membuka peluang baru dan memberikan banyak kemungkinan bagi bisnis yang ingin meningkatkan efisiensi dan desain makanan. Pencetakan makanan secara signifikan merampingkan metode tradisional dan berpotensi menjadi norma selama dekade mendatang. Saat ini, percetakan makanan bukan lagi sebuah ide, tapi kenyataan. Teknologi ini dapat merevolusi inovasi dan produksi makanan melalui penyesuaian, kreativitas yang lebih baik, dan keberlanjutan.

Saat ini, pencetakan makanan 3D sedang diterapkan pada area makanan, seperti makanan militer, makanan luar angkasa, makanan lansia, dan makanan-makanan manis. Beberapa faktor meningkatkan popularitas industri percetakan makanan. Demografi Milenial yang

berpengaruh telah banyak berfokus pada makanan sebagai bagian penting dari kesadaran sosial, politik, dan ekonomi mereka. Fokus mereka pada makanan segar, dipersonalisasi, dan dibuat sesuai pesanan telah menjadi perkembangan yang mengubah permainan untuk industri makanan. Printer pangan juga menjadi lebih terjangkau. Selain itu, produsen meningkatkan kemampuan printer untuk meningkatkan kreativitas kuliner dan penyesuaian nutrisi dan bahan. Tidak jauh di masa depan di mana kita mungkin makan pizza, pasta, atau brownies yang semuanya dicetak oleh pencetak pangan.

Printer pangan, meskipun menguntungkan, masih merupakan teknologi baru yang harus mengatasi beberapa tantangan, termasuk biaya, kecepatan, dan kemudahan penggunaan. Namun, printer 3D semakin baik setiap tahun, dan harganya turun karena meningkatnya adopsi dan perkembangan teknologi. Masa depan pencetakan pangan 3D cerah, karena tidak ada batasan ruang lingkup dan masa depan industri pencetakan kuliner 3D. Teknologi ini akan memiliki dampak besar pada ekonomi global, memberikan konsumen tingkat kebebasan yang signifikan dalam memilih jenis pangan yang ingin mereka konsumsi. Namun, beberapa ahli berpendapat bahwa printer pangan 3D masih kehilangan kemampuan untuk benar-benar memasak atau memanggang.

Di sisi lain, aplikasi printer pangan dinilai masih primitif dengan struktur internal yang terbatas atau tekstur yang monoton. Dengan demikian, diperlukan pengembangan dalam cara sistematis untuk menyelidiki bahan cetak, desain platform, teknologi pencetakan dan pengaruhnya terhadap fabrikasi makanan. Sementara itu, proses desain makanan harus terstruktur untuk meningkatkan kreativitas konsumen, proses fabrikasi harus diukur untuk mencapai hasil fabrikasi yang konsisten, dan model simulasi harus dikembangkan untuk menghubungkan desain dan fabrikasi dengan kontrol nutrisi. Dengan pengembangan antarmuka pengguna berbasis web terbuka yang interaktif, pencetak makanan dapat menjadi bagian dari sistem ekologi, dengan mesin berjaringan dapat memesan bahan baru, menyiapkan

makanan favorit sesuai permintaan, dan bahkan berkolaborasi dengan dokter untuk mengembangkan pola makan yang lebih sehat.

Dari tinjauan teknologi ini, dapat dilihat bahwa pencetakan makanan dapat memberikan pengaruh yang signifikan pada berbagai jenis pengolahan makanan, yang memungkinkan desainer/pengguna untuk memanipulasi bentuk dan bahan dengan kemampuan yang ditingkatkan dan belum pernah terjadi sebelumnya. Keceragaman ini, yang diterapkan pada layanan memasak atau katering domestik, dapat meningkatkan efisiensi untuk memberikan makanan segar berkualitas tinggi kepada konsumen, memberikan nutrisi yang dipersonalisasi, dan memungkinkan pengguna untuk mengembangkan rasa, tekstur, dan bentuk baru untuk menciptakan pengalaman makan yang sepenuhnya baru.



Daftar Pustaka

- Abelseth, B. (2018). Blockchain tracking and cannabis regulation: Developing a permissioned blockchain network to track Canada's cannabis supply chain. *Dalhousie Journal of Interdisciplinary Management*, 14.
- Abdullah, Pertiwi, N., Amir, F., & Sapareng, S., (2017, September). Citizen behavior model in urban farming development. *Proceedings of the 2nd International Conference on Education, Science, and Technology (IcestICEST 2017)*, 149, (16–18.). Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/icest-17.2017.6>
- AgFunder News (2018, 11 September). Maersk leads blockchain of food startup Ripe.io \$2.4m seed round. *Ripe*. <https://agfundernews.com/maersk-leads-blockchain-of-food-startup-ripeio-2-4m-seed-round.html>.
- Aggestam, V., Fleiß, E., & Posch, A. (2017). Scaling-up short food supply chains? A survey study on the drivers behind the intention of food producers. *Journal of Rural Studies*, 51, 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2017.02.003>

- Ahlstrom, D. (2010.). Innovation and growth: How business contributes to society. *Academy of management perspectives*, 24(3), 11–24.
- Ahumada, O., & Villalobos, J. R. (2009). Application of planning models in the agri-food supply chain: A review. *European Journal of Operational Research*, 196(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.014>
- Ahumada, O., & Villalobos, J. R. (2011). A tactical model for planning the production and distribution of fresh produce. *Annals of Operations Research*, 190(1), 339–358. <https://doi.org/10.1007/s10479-009-0614-4>
- Aich, S., Chakraborty, S., Sain, M., Lee, H. I., & Kim, H. C. (2019, Februari). A review on benefits of IoT Integrated Blockchain based Supply Chain Management Implementations across different sectors with case study. *International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)* (138–141). IEEE. <https://doi.org/10.23919/ICACT.2019.8701910>
- Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Process*, 34(50), 179–211. <https://doi.org/10.1080/10410236.2018.1493416>
- Akkerman, R., Farahani, P., & Grunow, M. (2010). Quality, safety and sustainability in food distribution: A review of quantitative operations management approaches and challenges. *OR Spectrum*, 32(4.), 863–904. <https://doi.org/10.1007/s00291-010-0223-2>
- Albakir, S. N. W. S. M., & Mohd-Mokhtar, R. (2011). A conceptual design of genuine Halal logo detector. *2011 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, IST 2011 - Proceedings*, 296–301. <https://doi.org/10.1109/IST.2011.5962198>
- Alfian, G., Rhee, J., Ahn, H., Lee, J., Farooq, U., Ijaz, M. F., & Syaek-honi, M. A. (2017). Integration of RFID, wireless sensor networks, and data mining in an e-pedigree food traceability system. *Journal of Food Engineering*, 212, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.008>
- Allaoui, H., Guo, Y., & Sarkis, J. (2019). Decision support for collaboration planning in sustainable supply chains. *Journal of*

- Cleaner Production*, 229, 761–774. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.367>
- Ali, M. H., Chung, L., Kumar, A., Zailani, S., & Tan, K. H. (2021). A sustainable Blockchain framework for the halal food supply chain: Lessons from Malaysia. *Technological Forecasting and Social Change*, 170(Desember 2020), 120870. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120870>
- Altawy, R., Elsheikh, M., Youssef, A. M., & Gong, G. (2018). Lelantos: A blockchain-based anonymous physical delivery system. *Proceedings - 2017 15th Annual Conference on Privacy, Security and Trust (PST)* (15–24). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PST.2017.00013>
- Anir, N. A., Nizam, M. D. N. M. H., & Masliyana, A. (2008). The users perceptions and opportunities in Malaysia in introducing RFID system for Halal food tracking. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, 5(5), 843–852.
- Arif-Uz-Zaman, K., & Ahsan, A. M. M. N. (2014). Lean supply chain performance measurement. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 63(5), 588–612. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-05-2013-0092>
- Aschberger, K., Micheletti, C., Sokull-Klüttgen, B., & Christensen, F. M. (2011). Analysis of currently available data for characterising the risk of engineered nanomaterials to the environment and human health - Lessons learned from four case studies. *Environment International*, 37(6), 1143–1156. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.02.005>
- Bag, S., Telukdarie, A., Pretorius, J. H. C., & Gupta, S. (2018). Industry 4.0 and supply chain sustainability: framework and future research directions. *Benchmarking*, 28(5), 1410–1450. <https://doi.org/10.1108/BIJ-03-2018-0056>
- Bahrami, A., Moaddabdoost Baboli, Z., Schimmel, K., Jafari, S. M., & Williams, L. (2020). Efficiency of novel processing technologies for the control of *Listeria monocytogenes* in food products. *Trends in Food Science and Technology*, 96, 61–78. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.009>

- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229, 107776. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>
- Bakker, C. A., Den Hollander, M. C., Van Hinte, E., & Zijlstra, Y. (2014). *Products that last: Product design for circular business models*. TU Delft Library.
- Ball, D., Ross, P., English, A., Patten, T., Upcroft, B., Fitch, R., Sukkari, S., Wyeth, G., & Corke, P. (2015). Robotics for Sustainable Broad-Acre Agriculture. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 105(November). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07488-7>
- Baltic, M., Boskovic, M., Ivanovic, J., Dokmanovic, M., Janjic, J., Loncina, J., & Baltic, T. (2013). Nanotechnology and its potential applications in meat industry. *Tehnologija Mesa*, 54(2), 168–175. <https://doi.org/10.5937/tehmesa1302168b>
- Barro, S., & Davenport, T. H. (2019). People and machines: Partners in Innovation. *MIT Sloan Manag. Rev.*, 60(4), 22–28.
- Basu, S., Omotubora, A., Beeson, M., & Fox, C. (2020). Legal framework for small autonomous agricultural robots. *AI and Society*, 35(1), 113–134. <https://doi.org/10.1007/s00146-018-0846-4>
- BBC (2018, 20 Desember). Third of rare scotch whiskies found to be fake. *BBC news*. <https://www.bbc.co.uk/news/uk-scotland-scotland-business-46566703>.
- Beekman, J., & Bodde, R. (2015). Milking automation is gaining popularity. *Dairy Global*. <https://www.dairyglobal.net/dairy/milking/milking-automation-is-gaining-popularity/>
- Beier, G., Niehoff, S., & Xue, B. (2018). More sustainability in industry through Industrial Internet of Things? *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(2), 219. <https://doi.org/10.3390/app8020219>
- Belaud, J. P., Prioux, N., Vialle, C., & Sablayrolles, C. (2019). Big data for agri-food 4.0: Application to sustainability management for by-products supply chain. *Computers in Industry*, 111, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.06.006>
- Bellante, L. (2017). Building the local food movement in Chiapas, Mexico: rationales, benefits, and limitations. *Agriculture and*

- Human Values*, 34(1), 119–134. <https://doi.org/10.1007/s10460-016-9700-9>
- Ben-Daya, M., Hassini, E., & Bahroun, Z. (2019). Internet of things and supply chain management: a literature review. *International Journal of Production Research*, 57(15–16), 4719–4742. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1402140>
- Benelux Office for Intellectual Property (BOIP). (2020). *Designations of origin, geographical indications and traditional specialties*. <https://www.boip.int/en/entrepreneurs/intellectual-property/designations-of-origin-geographical-indications-and-traditional-specialties>
- Berman, B. (2008). Strategies to detect and reduce counterfeiting activity. *Business Horizons*, 51(3), 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2008.01.002>
- Bhattarai, A. (2020, 12 April). It feels like a war zone: As more of them die, grocery workers increasingly fear showing up at work. *Washington Post*. <https://wapo.st/3DVITsA>
- Bhinge, R., Srinivasan, A., Robinson, S., & Dornfeld, D. (2015). Data-intensive life cycle assessment (DILCA) for deteriorating products. *Procedia CIRP*, 29, 396–401. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.192>
- Bi, Z., Xu, L. Da, & Wang, C. (2014). Internet of things for enterprise systems of modern manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(2), 1537–1546. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2300338>
- Bibi, F., Guillaume, C., Gontard, N., & Sorli, B. (2017). A review: RFID technology having sensing aptitudes for food industry and their contribution to tracking and monitoring of food products. *Trends in Food Science and Technology*, 62, 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.013>
- Biggs, J. (2017, 14 Februari). Researchers simulate a ransomware attack on industrial controls. *TechCrunch*. <http://tcn.ch/2l0TIjK>
- Birkel, H., & Müller, J. M. (2021). Potentials of industry 4.0 for supply chain management within the triple bottom line of sustainability

- A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125612. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125612>
- Blackburn, J., & Scudder, G. (2009). Supply chain strategies for perishable products: The case of fresh produce. *Production and Operations Management*, 18(2), 129–137. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2009.01016.x>
- Blakeney, M. (2019). *Food loss and food waste: Causes and solutions*. Edward Edgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781788975391>
- Boccia, F., & Sarnacchiaro, P. (2018). The Impact of corporate social responsibility on consumer preference: A structural equation analysis. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 25(2), 151–163. <https://doi.org/10.1002/csr.1446>
- Bodner, D. A. (2014). Enterprise modeling framework for counterfeit parts in defense systems. *Procedia Computer Science*, 36(C), 425–431. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.09.016>
- Bogue, R. (2020). Fruit picking robots: has their time come? *Industrial Robot*, 47(2), 141–145. <https://doi.org/10.1108/IR-11-2019-0243>
- Bonaccorsi, M., Betti, S., Rateni, G., Esposito, D., Brischetto, A., Marseglia, M., Dario, P., & Cavallo, F. (2017). ‘HighChest’: An augmented freezer designed for smart food management and promotion of eco-efficient behaviour. *Sensors (Switzerland)*, 17(6). <https://doi.org/10.3390/s17061357>
- Bonilla, S. H., Silva, H. R. O., da Silva, M. T., Gonçalves, R. F., & Sacomano, J. B. (2018). Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges. *Sustainability (Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/su10103740>
- Botta, A., De Donato, W., Persico, V., & Pescapé, A. (2016). Integration of cloud computing and Internet of Things: A survey. *Future Generation Computer Systems*, 56, 684–700. <https://doi.org/10.1016/j.future.2015.09.021>
- Bouzembrak, Y., Klüche, M., Gavai, A., & Marvin, H. J. P. (2019). Internet of Things in food safety: Literature review and a bibliometric analysis. *Trends in Food Science and Technology*, 94, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.11.002>

- Bowen, S. (2010). Embedding local places in global spaces: Geographical indications as a territorial development strategy. *Rural Sociology*, 75(2), 209–243. <https://doi.org/10.1111/j.1549-0831.2009.00007.x>
- Boyer, K. K., Prud'homme, A. M., & Chung, W. (2009). The last mile challenge: Evaluating the effects of customer density and delivery window patterns. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 30(1), 185–201. [https://doi.org/10.1016/0002-9378\(51\)90343-2](https://doi.org/10.1016/0002-9378(51)90343-2)
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., & Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 299–312. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032>
- Brock, D. L. (2001). The electronic product code (EPC): a naming scheme for physical objects. *Auto-ID Center White Paper WH-002*. MIT, Cambridge, MA.
- Brougham, D., & Haar, J. (2018). Smart technology, artificial intelligence, robotics, and algorithms (STARA): Employees' perceptions of our future workplace. *Journal of Management and Organization*, 24(2), 239–257. <https://doi.org/10.1017/jmo.2016.55>
- Brozzi, R., Forti, D., Rauch, E., & Matt, D. T. (2020). The advantages of industry 4.0 applications for sustainability: Results from a sample of manufacturing companies. *Sustainability (Switzerland)*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/su12093647>
- Bruce, J. (2013). Purely P2P Crypto-Currency With Finite Mini-Blockchain. *Bitfreak.Info*. <http://cryptonite.info/files/mbc-scheme-rev2.pdf>
- Brunner, T. A., Delley, M., & Denkel, C. (2018). Consumers' attitudes and change of attitude toward 3D-printed food. *Food Quality and Preference*, 68, 389–396. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2017.12.010>
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. (2010, 13 Desember). Verordnung über die Zulassung von Personen zum Straßenverkehr (Fahrerlaubnis-Verordnung - FeV). *Bun-*

- desministerium der Justiz und für Verbraucherschutz*. <https://bit.ly/3zQfdcR>
- Camaréna, S. (2020). Artificial intelligence in the design of the transitions to sustainable food systems. *Journal of Cleaner Production*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122574>
- Calenda, C. (2016), Italy's plan INDUSTRIA 4.0, <https://bit.ly/2V0NzKx> (accessed July 2021). --> CEK KEMBALI
- Cano, X. P. (2020, 1 Oktober). Contactless fulfillment: Is curbside pickup the new BOPIS? *Openbravo*. <https://www.openbravo.com/blog/contactless-fulfillment-is-curbside-pickup-the-new-bopis/>
- Cao, C., Andrews, J. B., & Franklin, A. D. (2017). Completely printed, flexible, stable, and hysteresis-free carbon nanotube thin-film transistors via aerosol jet printing. *Advanced Electronic Materials*, 3(5), 1–10. <https://doi.org/10.1002/aelm.201700057>
- Caro, M. P., Ali, M. S., Vecchio, M., & Giaffreda, R. (2018). Blockchain-based traceability in Agri-Food supply chain management: A practical implementation. *2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture - Tuscany (IOT Tuscany)* (1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IOT-TUSCANY.2018.8373021>
- Castelo-Branco, I., Cruz-Jesus, F., & Oliveira, T. (2019). Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union. *Computers in Industry*, 107, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.01.007>
- CDC (2018). Centers for disease control and prevention. Centers for Disease Control and Prevention. <https://www.cdc.gov/foodborneburden/2011-foodborne-estimates.html>
- Cecchini, C. (2017.). Artificial intelligence in the food industry: Empowering farmers' decision-making. *Foodtank: The Think Tank for Food*. <https://foodtank.com/news/2017/11/artificial-intelligence-part3/>
- Cerrada-Serra, P., Moragues-Faus, A., Zwart, T. A., Adlerova, B., Ortiz-Miranda, D., & Avermaete, T. (2018). Exploring the contribution of alternative food networks to food security. A comparative analysis. *Food Security*, 10, 1371–1388.

- Ceschin, F., & Gaziulusoy, I. (2016). Evolution of design for sustainability: From product design to design for system innovations and transitions. *Design Studies*, 47, 118–163. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2016.09.002>
- Chan, J. K. H. (2018). Design ethics: Reflecting on the ethical dimensions of technology, sustainability, and responsibility in the Anthropocene. *Design Studies*, 54, 184–200. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.09.005>
- Chang, Y., Iakovou, E., & Shi, W. (2020). Blockchain in global supply chains and cross border trade: a critical synthesis of the state-of-the-art, challenges and opportunities. *International Journal of Production Research*, 58(7), 2082–2099. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1651946>
- Chellaram, C., Murugaboopathi, G., John, A. A., Sivakumar, R., Ganesan, S., Krithika, S., & Priya, G. (2014). Significance of Nanotechnology in Food Industry. *APCBEE Procedia*, 8, 109–113. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2014.03.010>
- Chen, H., Chiang, R. H., & Storey, V. C. (2012). Business intelligence and analytics: from big data to big impact. *MIS Quarterly*, 36(4), 1165–1188. <http://www.jstor.org/stable/41703503>
- Chen, L. (2021). Research on forecast model of Chinese coffee export trade market based on SVM. *Journal of Physics: Conference Series*, 1774(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1774/1/012068>
- Chen, S., Xu, H., Liu, D., Hu, B., & Wang, H. (2014). A vision of IoT: Applications, challenges, and opportunities with China Perspective. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(4), 349–359. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2337336>
- Chiarini, A., Belvedere, V., & Grando, A. (2020). Industry 4.0 strategies and technological developments. An exploratory research from Italian manufacturing companies. *Production Planning and Control*, 31(16), 1385–1398. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1710304>

tions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey¼60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921.

- Cushen, M., Kerry, J., Morris, M., Cruz-Romero, M., & Cummins, E. (2012). Nanotechnologies in the food industry - Recent developments, risks and regulation. *Trends in Food Science and Technology*, 24(1), 30–46. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.10.006>
- Darvishi, F., Ariana, M., Marella, E. R., & Borodina, I. (2018). Advances in synthetic biology of oleaginous yeast *Yarrowia lipolytica* for producing non-native chemicals. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 102(14), 5925–38.
- Das, R., & Chansin, G. (2013). Smart packaging comes to market: Brand enhancement with electronics 2014–2024. *IDTechEx*. <https://www.idtechex.com/en/research-report/smart-packaging-comes-to-market-brand-enhancement-with-electronics-2014-2024/360>
- Dasgupta, N., Ranjan, S., Mundekkad, D., Ramalingam, C., Shanker, R., & Kumar, A. (2015). Nanotechnology in agro-food: From field to plate. *Food Research International*, 69, 381–400. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.005>
- Davidsson, P., Hajinasab, B., Holmgren, J., Jevinger, Å., & Persson, J. A. (2016). The fourth wave of digitalization and public transport: Opportunities and challenges. *Sustainability (Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/su8121248>
- de Paula Arruda Filho, N. (2017). The agenda 2030 for responsible management education: An applied methodology. *International Journal of Management Education*, 15(2), 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.ijme.2017.02.010>
- Dempsey, N., Bramley, G., Power, S., & Brown, C. (2011). The social dimension of sustainable development: Defining urban social sustainability. *Sustainable Development*, 19(5), 289–300. <https://doi.org/10.1002/sd.417>
- Deppermann, A., Havlík, P., Valin, H., Boere, E., Herrero, M., Vervoort, J., & Mathijs, E. (2018). The market impacts of shortening feed supply chains in Europe. *Food Security*, 10(6), 1401–1410. <https://doi.org/10.1007/s12571-018-0868-2>

- DeutscheWelle. (2020). Coronavirus: German slaughterhouse outbreak crosses 1,000. *Deutsche Welle*. <https://www.dw.com/en/coronavirus-german-slaughterhouse-outbreak-crosses-1000/a-53883372>
- Di Vaio, A., Boccia, F., Landriani, L., & Palladino, R. (2020). Artificial intelligence in the agri-food system: Rethinking sustainable business models in the Covid-19 scenario. *Sustainability (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/SU12124851>
- Doan, A., Halevy, A., & Ives, Z. (2012). *Principles of data integration*. Morgan Kaufmann Publishers.
- Doinea, M., Boja, C., Batagan, L., Toma, C., & Popa, M. (2015). Internet of things based systems for food safety management. *Informatica Economica*, 19(1), 87–97. <https://doi.org/10.12948/issn14531305/19.1.2015.08>
- Dong, L., Mingyue, R., & Guoying, M. (2017). Application of internet of things technology on predictive maintenance system of coal equipment. *Procedia Engineering*, 174, 885–889. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.237>
- Donsi, F., & Ferrari, G. (2016). Essential oil nanoemulsions as antimicrobial agents in food. *J. Biotechnol.*, 233, 106–20.
- Doole, M., Ellerbroek, J., & Hoekstra, J. (2018). Drone delivery: Urban airspace traffic density estimation. Dalam: *SIDS2018: 8th SESAR Innovation Days*. <https://research.tudelft.nl/en/publications/drone-delivery-urban-airspace-traffic-density-estimation>
- Dou, Z., Ferguson, J. D., Galligan, D. T., Kelly, A. M., Finn, S. M., & Giegengack, R. (2016). Assessing U.S. food wastage and opportunities for reduction. *Global Food Security*, 8, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.02.001>
- Doudna, J. A., & Sternberg, S. H. (2017). *A Crack in creation: Gene editing and the unthinkable power to control evolution*. Houghton Mifflin Harcourt.
- Douet, M. (2016). Change drivers across supply chains: the case of fishery and aquaculture in France. *Transportation Research Procedia*, 14(0), 2830–2839. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.349>

- Duong, L. N. K., Wood, L. C., & Wang, W. Y. C. (2018). Effects of consumer demand, product lifetime, and substitution ratio on perishable inventory management. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(5). <https://doi.org/10.3390/su10051559>
- Dutta, P., & Mitra, S. (2021). Application of agricultural drones and IoT to understand food supply chain during post COVID-19. *Agricultural Informatics: Automation Using the IoT and Machine Learning*, 67–87.
- EcoInvent Life Cycle Inventory Database. (2017). *Database Initiatives*. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-association/database-initiatives/>
- Economic Commission for Europe Inland Transport Committee. (1968). *Convention on Road*. <https://bit.ly/3zKtZS5>
- The Economist. (2020). America's Covid-19 experience is tragic but not that exceptional. The Economist, May 28. <https://www.economist.com/briefing/2020/05/28/americas-covid-19-experience-is-tragic-but-not-that-exceptional>
- Ejsmont, K., Gladysz, B., & Aldona Kluczek. (2019). Impact of Industry 4.0 on Manufacturing. *Transforming Industrial Policy for the Digital Age*, 11–11. <https://doi.org/10.4337/9781788976152.00006>
- El-Bendary, N., El Hariri, E., Hassanien, A. E., & Badr, A. (2015). Using machine learning techniques for evaluating tomato ripeness. *Expert Systems with Applications*, *42*(4), 1892–1905. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.09.057>
- Enahoro, D., Mason-D'Croz, D., Mul, M., Rich, K. M., Robinson, T. P., Thornton, P., & Staal, S. S. (2019). Supporting sustainable expansion of livestock production in South Asia and Sub-Saharan Africa: Scenario analysis of investment options. *Global Food Security*, *20*, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.01.001>
- Eriksson, M., Malefors, C., Callewaert, P., Hartikainen, H., Pietiläinen, O., & Strid, I. (2019). What gets measured gets managed – Or does it? Connection between food waste quantification and food waste reduction in the hospitality sector. *Resources, Conservation and Recycling: X*, *4*, 100021. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100021>

- EPA. (2019). Global Greenhouse Gas Emissions Data. *United States Environmental Protection Agency*. <https://www.epa.gov/ghgemissions/globalgreenhouse-gas-emissions-data>.
- Esteso, A., Alemany, M. M. E., & Ortiz, A. (2017). Deterministic and uncertain methods and models for managing agri-food supply chain. *Direccion y Organizacion*, 62, 41–46.
- Esteso, A., Alemany, M. M. E., & Ortiz, A. (2018). Conceptual framework for designing agri-food supply chains under uncertainty by mathematical programming models. *International Journal of Production Research*, 56(13), 4418–4446. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1447706>
- European Commission Regulation. (2002). Regulation (EC) No. 178/2002 of the European Parliament and of the Council, Official Journal L 031, February, p. 0001 – 0024. *EUR-Lex* . <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002R0178:EN:HTML>
- European Commission Guidelines. (2014). Geographical indications and traditional specialties. http://ec.europa.eu/agriculture/quality/schemes/guides/guide-forapplicants_en.pdf
- Europol. (2016). Operation OPSON V - Report. In *Europol* (Issue October). <https://www.europol.europa.eu/publications-documents/operation-opson-v-report>
- Eurostat. (2018). *Compilers Guide on European statistics on international trade in goods by enterprise characteristics (TEC)*.
- Faheem, M., Shah, S. B. H., Butt, R. A., Raza, B., Anwar, M., Ashraf, M. W., Ngadi, M. A., & Gungor, V. C. (2018). Smart grid communication and information technologies in the perspective of Industry 4.0: Opportunities and challenges. *Computer Science Review*, 30, 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2018.08.001>
- Fantinato, M., Hung, P. C., Jiang, Y., Roa, J., Villarreal, P., Melaisi, M., & Amancio, F. (2018, Januari). Perceived innovativeness and privacy risk of smart toys in Brazil and Argentina. *Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences*.
- FAO. (2012). Sustainability Pathways Share of Livestock Production in Global Land Surface Did You Know? Why Does Livestock

- Matter for Sustainability? *Livestock and Landscapes*, All. <http://www.fao.org/docrep/018/ar591e/ar591e.pdf>
- FAO. (2018). The future of food and agriculture—Alternative pathways to 2050, Rome.
- FAO. (2018a). Sustainable food systems - Concept and framework. 1–8. <http://www.fao.org/3/ca2079en/CA2079EN.pdf>
- FAO. (2018b). The State of Food Security and Nutrition in the World 2018. Building climate resilience for food security and nutrition. *Current Developments in Nutrition* 10(1). <https://bit.ly/3wZ6KmK>
- FAO. (2021). Food Fraud. *Encyclopedia of Food and Health*, 35–42. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00010-6>
- Faridz, D., & Griffiths, J. (2018). More than 80 dead from drinking bootleg alcohol in Indonesia. <https://edition.cnn.com/2018/04/12/health/indonesia-fake-alcoholfakealcohol-intl/index.html>
- Figorilli, S., Antonucci, F., Costa, C., Pallottino, F., Raso, L., Castiglione, M., Pinci, E., Del Vecchio, D., Colle, G., Proto, A. R., Sperandio, G., & Menesatti, P. (2018). A blockchain implementation prototype for the electronic open source traceability of wood along the whole supply chain. *Sensors (Switzerland)*, 18(9), 1–12. <https://doi.org/10.3390/s18093133>
- Filippini, R., Marraccini, E., Houdart, M., Bonari, E., & Lardon, S. (2016). Food production for the city: hybridization of farmers' strategies between alternative and conventional food chains. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40(10), 1058–1084. <https://doi.org/10.1080/21683565.2016.1223258>
- Flanagan, K., Clowes, A., Lipinski, B., Goodwin, L., & Swannell, R. (2018). SDG Target 12.3 on food loss and waste: 2018 progress report. An annual update on behalf of Champions 12.3. *Champions 12.3, September*, 1–28. <http://www.champions123.org>.
- Floreano, D., & Wood, R. J. (2015). Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*, 521(7553), 460–466. <https://doi.org/10.1038/nature14542>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2011). *Food loss and food waste*. <http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/en/>

- Food Loss and Waste Protocol (FLW Protocol). (2016). *Food Loss and Waste Accounting and Reporting Standard*.
- Food SCP Round Table European Commission. (2012). *Continuous Environmental Improvement-Final Report*.
- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573–1587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>
- Fu, J. R., Ju, P. H., & Hsu, C. W. (2015). Understanding why consumers engage in electronic word-of-mouth communication: Perspectives from theory of planned behavior and justice theory. *Electronic Commerce Research and Applications*, 14(6), 616–630. <https://doi.org/10.1016/j.elerap.2015.09.003>
- Fuertes, G., Soto, I., Carrasco, R., Vargas, M., Sabattin, J., & Lagos, C. (2016). Intelligent Packaging Systems: Sensors and Nanosensors to Monitor Food Quality and Safety. *Journal of Sensors*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/4046061>
- Furstenau, L. B., Sott, M. K., Kipper, L. M., MacHado, E. L., Lopez-Robles, J. R., Dohan, M. S., Cobo, M. J., Zahid, A., Abbasi, Q. H., & Imran, M. A. (2020). Link between Sustainability and Industry 4.0: Trends, Challenges and New Perspectives. *IEEE Access*, 8, 140079–140096. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3012812>
- Galvez, J. F., Mejuto, J. C., & Simal-Gandara, J. (2018). Future challenges on the use of blockchain for food traceability analysis. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 107, 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.08.011>
- GAO, U.S. Government Accountability Office. (2010). Intellectual Property: Observations on Efforts to Quantify the Economic Effects of Counterfeit and Pirated Goods. *Report to Congressional Committees*. GAO-10-423.
- Gao, B. Y., Holroyd, S. E., Moore, J. C., Laurvick, K., Gendel, S. M., & Xie, Z. H. (2019). Opportunities and challenges using non-targeted methods for food fraud detection. *J. Agric. Food Chem.* 67, 8425–30

- Garbie, I. H. (2010). Enhancing the performance of industrial firms through implementation of lean techniques. *IIE Annual Conference and Expo 2010 Proceedings*, 2010.
- Gardas, B. B., Raut, R. D., Cheikhrouhou, N., & Narkhede, B. E. (2019). A hybrid decision support system for analyzing challenges of the agricultural supply chain. *Sustainable Production and Consumption*, 18, 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.11.007>
- Gawanmeh, A., Parvin, S., Venkatraman, S., De Souza-Daw, T., Kang, J., Kaspi, S., & Jackson, J. (2019). A framework for integrating big data security into agricultural supply chain. *Proceedings - 5th IEEE International Conference on Big Data Service and Applications, BigDataService 2019, Workshop on Big Data in Water Resources, Environment, and Hydraulic Engineering and Workshop on Medical, Healthcare, Using Big Data Technologies*, 191–194. <https://doi.org/10.1109/BigDataService.2019.00032>
- Gázquez, J. A., Castellano, N. N., & Manzano-Agugliaro, F. (2016). Intelligent low cost telecontrol system for agricultural vehicles in harmful environments. *Journal of Cleaner Production*, 113, 204–215. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.015>
- Ge, H., Nolan, J., Gray, R., Goetz, S., & Han, Y. (2016). Supply chain complexity and risk mitigation—A hybrid optimization–simulation model. *International Journal of Production Economics*, 179, 228–238. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.06.014>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gellynck, X., & Kühne, B. (2008). Innovation and collaboration in traditional food chain networks. *Journal on Chain and Network Science*, 8(2), 121–129. <https://doi.org/10.3920/JCNS2008.x094>
- Gertrude Chavez-Dreyfuss. (2018). Coca-Cola, U.S. State Dept to use blockchain to combat forced labor. Reuters. <https://www.reuters.com/article/us-blockchain-coca-colalabor/coca-cola-u-s-state-dept-to-use-blockchain-to-combat->

forced-laboridUSKCN1GS2PY?mc_cid=d7c996d219&mc_eid=4c123074ea.

- GeSI (Global e-Sustainability Initiative). (2015). SMARTer2030: ICT solutions for 21st century challenges. Belgium. https://smarter2030.gesi.org/downloads/Chapter_Food.pdf.
- Ghadimi, P., Wang, C., Lim, M. K., & Heavey, C. (2019). Intelligent sustainable supplier selection using multi-agent technology: Theory and application for Industry 4.0 supply chains. *Computers and Industrial Engineering*, *127*, 588–600. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.050>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, *114*, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Ghobakhloo, M., 2020. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *J. Clean. Prod.* *252*, 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>.
- Giampietri, E., Verneau, F., Del Giudice, T., Carfora, V., & Finco, A. (2018). A Theory of Planned behaviour perspective for investigating the role of trust in consumer purchasing decision related to short food supply chains. *Food Quality and Preference*, *64*(June 2017), 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2017.09.012>
- Gibson, E. (2019). The crucial ingredient our diet lacks. *BBC*. <https://www.bbc.com/future/bespoke/followthe-food/the-crucial-ingredient-our-diet-lacks/>
- Gigler, J. K., Hendrix, E. M. T., Heesen, R. A., Van Den Hazelkamp, V. G. W., & Meerdink, G. (2002). On optimisation of agri chains by dynamic programming. *European Journal of Operational Research*, *139*(3), 613–625. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00191-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00191-6)
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0: the Industrial Internet of Things*. Springer, Heidelberg.
- Givens, G., & Dunning, R. (2019). Distributor intermediation in the farm to food service value chain. *Renewable Agriculture and Food Systems*, *34*(3), 268–270. <https://doi.org/10.1017/S1742170517000746>

- Glavič, P., & Lukman, R. (2007). Review of sustainability terms and their definitions. *Journal of Cleaner Production*, 15(18), 1875–1885. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.12.006>
- Gobbo, J. A., Busso, C. M., Gobbo, S. C. O., & Carreño, H. (2018). Making the links among environmental protection, process safety, and industry 4.0. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 372–382. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.017>
- Goodman, D., & Watts, M. J. (1997). *Globalising Food: Agrarian Questions and Global Restructuring*. Routledge.
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- Grainger, M. J., Aramyan, L., Logatcheva, K., Piras, S., Righi, S., Setti, M., Vittuari, M., & Stewart, G. B. (2018). The use of systems models to identify food waste drivers. *Global Food Security*, 16, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.12.005>
- Grau, G., Cen, J., Kang, H., Kitsomboonloha, R., Scheideler, W. J., & Subramanian, V. (2016). Gravure-printed electronics: Recent progress in tooling development, understanding of printing physics, and realization of printed devices. *Flexible and Printed Electronics*, 1(2), 0–65. <https://doi.org/10.1088/2058-8585/1/2/023002>
- Gray, N. (2010, 23 Desember). *Looking to the future: Creating novel foods using 3D printing*. *Food Navigator*. <https://bit.ly/36qgmy1>
- Grimm, J. H., Hofstetter, J. S., & Sarkis, J. (2016). Exploring sub-suppliers' compliance with corporate sustainability standards. *Journal of Cleaner Production*, 112, 1971–1984. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.036>
- Gruchmann, T., Seuring, S., & Petljak, K. (2019). Assessing the role of dynamic capabilities in local food distribution: A theory-elaboration study. *Supply Chain Management*, 24(6), 767–783. <https://doi.org/10.1108/SCM-02-2019-0073>
- Gružauskas, V., Baskutis, S., & Navickas, V. (2018). Minimizing the trade-off between sustainability and cost effective performance

- by using autonomous vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 184, 709–717. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.302>
- Gu, F., Guo, J., Hall, P., & Gu, X. (2019). An integrated architecture for implementing extended producer responsibility in the context of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 57(5), 1458–1477. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1489161>
- Gualtieri, L., Palomba, I., Merati, F. A., Rauch, E., & Vidoni, R. (2020). Design of human-centered collaborative assembly workstations for the improvement of operators' physical ergonomics and production efficiency: A case study. *Sustainability (Switzerland)*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/su12093606>
- Guide, V. D. R., & Van Wassenhove, L. N. (2009). The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations Research*, 57(1), 10–18. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0628>
- Gupta, S., Chen, H., Hazen, B. T., Kaur, S., & Santibañez Gonzalez, E. D. R. (2019). Circular economy and big data analytics: A stakeholder perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 144, 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.06.030>
- Gustavsson, J., Cederberg, C., & Sonesson, U. (2011). Global Food Losses and Food Waste: Extent, Causes and Prevention. Study Conducted for the International Congress Save Food! At Interpack, Düsseldorf, Germany. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. https://www.researchgate.net/publication/267919405_Global_Food_Losses_and_Food_Waste
- Haass, R., Dittmer, P., Veigt, M., & Lütjen, M. (2015). Reducing food losses and carbon emission by using autonomous control - A simulation study of the intelligent container. *International Journal of Production Economics*, 164, 400–408. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.12.013>
- Habash, Riadh. (2018). *Green Engineering: Innovation, Entrepreneurship and Design*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Hahn, T., Figge, F., Pinkse, J., & Preuss, L. (2010). Trade-offs in corporate sustainability: you can't have your cake and eat it: Trade-Offs in Corporate Sustainability: You Can't Have Your Cake and Eat

- It. *Business Strategy and the Environment*, 19(4), 217–229. <https://doi.org/10.1002/bse.v19:4>
- Hall, K. D., Guo, J., Dore, M., & Chow, C. C. (2009). The progressive increase of food waste in America and its environmental impact. *PLoS ONE*, 4(11), 9–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0007940>
- Hameed, I.A. A Coverage Planner for Multi-Robot Systems in Agriculture. *Proceedings of the IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*, Kandima, Maldives, 1–5 Agustus 2018; 698–704.
- Hamouda, Y., & Msallam, M. (2020). Variable sampling interval for energy-efficient heterogeneous precision agriculture using Wireless Sensor Networks. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 32(1), 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.04.010>
- Hao, J. T., Sun, Y., & Luo, H. (2018). A safe and efficient storage scheme based on blockchain and IPFs for agricultural products tracking. *Journal of Computers (Taiwan)*, 29(6), 158–167. <https://doi.org/10.3966/199115992018122906015>
- Hao, L., Mellor, S., Seaman, O., Henderson, J., Sewell, N., & Sloan, M. (2010). Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 5(2), 57–64. <https://doi.org/10.1080/17452751003753212>
- Haroon, A., Basharat, M., Khattak, A. M., & Ejaz, W. (2019). Internet of Things Platform for Transparency and Traceability of Food Supply Chain. *2019 IEEE 10th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference, IEMCON 2019*, 13–19. <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2019.8936158>
- Harris, J. (2019). Are dark kitchens the satanic mills of our era? *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/commentisfree/2018/oct/09/dark-kitchens-satanic-mills-deliveroo>.
- He, X., Aker, W. G., Fu, P. P., & Hwang, H. M. (2015). Toxicity of engineered metal oxide nanomaterials mediated by nano-bio-eco-interactions: A review and perspective. *Environmental Science: Nano*, 2(6), 564–582. <https://doi.org/10.1039/c5en00094g>

- Hensel K., & Kuhn, M. E. (2020, 1 Mei). Addressing a viral threat. *Food Technology Magazine*. <https://www.ift.org/news-and-publications/food-technology-magazine/issues/2020/may/features/addressing-a-viral-threat>
- Hernández, J. E., Kacprzyk, J., Lyons, A., Ortiz, A., & Panetto, H. (2018, Juli). Review on operational research advances in agri-food supply chains and societal challenges. Dalam: 29th European Conference on Operational Research, EURO'2018.
- Herrero, J. L., Lozano, J., Santos, J. P., Fernandez, J. A., & Marcelo, J. I. S. (2016). A Web-Based Approach for Classifying Environmental Pollutants Using Portable E-nose Devices. *IEEE Intelligent Systems*, 31(3), 108–112. <https://doi.org/10.1109/MIS.2016.48>
- Herweijer, C. (2018, 24 Januari). 8 Ways AI Can Help Save the Planet,” *World Economic Forum*, <https://www.weforum.org/agenda/2018/01/8-ways-ai-can-help-save-the-planet/>.
- Hew, J. J., Wong, L. W., Tan, G. W. H., Ooi, K. B., & Lin, B. (2020). The blockchain-based Halal traceability systems: a hype or reality? *Supply Chain Management*, 25(6), 863–879. <https://doi.org/10.1108/SCM-01-2020-0044>
- Hille, K. (2018, December 10). Taiwan’s rice farmers use big data to cope with climate change. *Financial Times*. <https://www.ft.com/content/9f5438fa-ee2d-11e8-89c8-d36339d835c0>
- Hilliard, D. C., Welch, J. N., Marvel, J. A., & Pattishall, B. W., 2007. Trademarks and Unfair Competition: Deskbook. LexisNexis Group: Matthew Bender, Chicago.
- Hinrichs, C. C. (2000). Embeddedness and local food systems: Notes on two types of direct agricultural market. *Journal of Rural Studies*, 16(3), 295–303. [https://doi.org/10.1016/S0743-0167\(99\)00063-7](https://doi.org/10.1016/S0743-0167(99)00063-7)
- Hoffman, A., & Munsterman, R. (2018). Dreyfus teams with banks for first agriculture blockchain trade. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-01-22/dreyfusteams-with-banks-for-first-agriculture-blockchain-trade>.
- Horton, P., Koh, L., & Guang, V. S. (2016). An integrated theoretical framework to enhance resource efficiency, sustainability and hu-

- man health in agri-food systems. *Journal of Cleaner Production*, 120, 164–169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.092>
- Hossain, M. S., & Muhammad, G. (2016). Cloud-assisted Industrial Internet of Things (IIoT) - Enabled framework for health monitoring. *Computer Networks*, 101, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2016.01.009>
- Hu, Z., Pan, J., Fan, T., Yang, R., & Manocha, D. (2019). Safe Navigation with Human Instructions in Complex Scenes. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2), 753–760. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2893432>
- Huang, Z., Yu, H., Peng, Z., & Feng, Y. (2017). Planning community energy system in the industry 4.0 era: Achievements, challenges and a potential solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 710–721. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.004>
- Hunter, J., & Riefa, C. (2018). The challenge of protecting EU consumers in global online markets. *Ratio*, 31(2), 252–266. <https://doi.org/10.1111/rati.2018.31.issue-2>
- Hwang, J., & Choe, J. Y. (Jacey). (2019). Exploring perceived risk in building successful drone food delivery services. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 31(8), 3249–3269. <https://doi.org/10.1108/IJCHM-07-2018-0558>
- Hwang, J., Kim, I., & Gulzar, M. A. (2020). Understanding the eco-friendly role of drone food delivery services: Deepening the theory of planned behavior. *Sustainability (Switzerland)*, 12(4), 1–12. <https://doi.org/10.3390/su12041440>
- Hwang, J., Lee, J. S., & Kim, H. (2019). Perceived innovativeness of drone food delivery services and its impacts on attitude and behavioral intentions: The moderating role of gender and age. *International Journal of Hospitality Management*, 81, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2019.03.002>
- Lin, C.-H., Shih, H.-Y., Sher, P. J., & Wang, Y.-L. (2005). Consumer adoption of e-service: Integrating technology readiness with the technology acceptance model. *A Unifying Discipline for Melting the Boundaries Technology Management*, 483–488. <https://doi.org/10.1109/PICMET.2005.1509728>

- ICT4Ag. (2017). Perspectives for ICT and Agribusiness in ACP countries: Start-up financing, 3D printing and blockchain. <http://www.fao.org/e-agriculture/events/ctaworkshop-perspectives-ict-and-agribusiness-acp-countries-start-financing-3dprinting-and->
- Ilbery, B., & Maye, D. (2005). Food supply chains and sustainability: Evidence from specialist food producers in the Scottish/English borders. *Land Use Policy*, 22(4), 331–344. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2004.06.002>
- International Data Corporation. (2017). Worldwide Semiannual Robotics and Drones Spending Guide. Framingham.
- Interpol (2018, 25 April). Deadly and dangerous fake food and drink seized in global operation. <https://www.interpol.int/en/News-and-Events/News/2018/Deadly-and-dangerous-fake-food-and-drink-seized-in-global-operation>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9781107415416>
- International Standards Organization (ISO). ISO 22300:2018(en) Security and resilience^{3/4}Vocabulary. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:22300:ed-2:v1:en>.
- ITUNews. (2018, 21 Agustus). ‘Food Trust’ partnership uses blockchain to increase food safety. <https://news.itu.int/food-trust-blockchain-food-safety/>
- Jabbari, A. (2021). Blockchain and Supply Chain Management. MHI. <https://www.mhi.org/downloads/learning/cicmhe/blockchain-and-supply-chain-management.pdf>
- Jagtap, S., Bhatt, C., Thik, J., & Rahimifard, S. (2019). Monitoring potato waste in food manufacturing using image processing and internet of things approach. *Sustainability (Switzerland)*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/su11113173>
- Jia, C., & Jukes, D. (2013). The national food safety control system of China - A systematic review. *Food Control*, 32(1), 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.11.042>
- Jie, B., Weilong, C., Ming, C., Fei, X., Xinghua, L., Junhua, C., Guobin, W., Kaixiong, T., & Xiaoming, S. (2015). Enhancer of zeste

- homolog 2 depletion induces cellular senescence via histone demethylation along the INK4/ARF locus. *International Journal of Biochemistry and Cell Biology*, 65, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2015.05.011>
- Jing, P., Huang, H., Ran, B., Zhan, F., & Shi, Y. (2019). Exploring the factors affecting mode choice intention of autonomous vehicle based on an extended theory of planned behavior-A case study in China. *Sustainability (Switzerland)*, 11(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su11041155>
- Jung, M., Kim, J., Koo, H., Lee, W., Subramanian, V., & Cho, G. (2014). Roll-to-roll gravure with nanomaterials for printing smart packaging. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 14(2), 1303–1317. <https://doi.org/10.1166/jnn.2014.9020>
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Forschungsunion.
- Kamath, R. (2018). Food traceability on blockchain: Walmart's pork and mango pilots with IBM. *The Journal of the British Blockchain Association (JBBA)*, 1(1), 3712.
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 408–425. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>
- Kamilaris, A., Fonts, A., & Prenafeta-Boldó, F. X. (2019). The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains. *Trends in Food Science and Technology*, 91, 640–652. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.034>
- Kamiloglu, S. (2019). Authenticity and traceability in beverages. *Food Chemistry*, 277, 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.091>
- Kamle, M., Mahato, D. K., Devi, S., Soni, R., Tripathi, V., Mishra, A. K., & Kumar, P. (2020). Nanotechnological interventions for plant health improvement and sustainable agriculture. *3 Biotech* 10(4), 1–11.

- Kaphle, A., Navya, P. N., Umaphathi, A., & Daima, H. K. (2018). Nanomaterials for agriculture, food and environment: Applications, toxicity and regulation. *Environ. Chem. Lett.* 16, 43–58.
- Kappelman, A. C., & Sinha, A. K. (2021). Optimal control in dynamic food supply chains using big data. *Computers and Operations Research*, 126, 105117. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105117>
- Karia, N., Asaari, M. H. A. H., Mohamad, N., & Kamaruddin, S. (2015). Assessing Halal logistics competence: An Islamic-based and resource-based view. *IEOM 2015 - 5th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Proceeding*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IEOM.2015.7093744>
- Karim, W., Haque, A., Anis, Z., & Ulfy, M. A. (2020). The Movement Control Order (MCO) for Covid-19 Crisis and its Impact on Tourism and Hospitality Sector in Malaysia. *International Tourism and Hospitality Journal*, 3(2), 1–7. <https://doi.org/10.37227/ithj-2020-02-09>
- Kaur, J., & Kaur, P. D. (2018). CE-GMS: A cloud IoT-enabled grocery management system. *Electronic Commerce Research and Applications*, 28, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.elerap.2018.01.005>
- Kawamura, A. G. (2020). Perspectives on Covid-19 and the Food and Agricultural System. Disampaikan dalam Covid-19 and the Food and Agricultural System, 19 Juni. <https://www.nationalacademies.org/event/06-19-2020/covid-19-and-the-food-and-agricultural-system>
- Keeble, B. R. (1988). The Brundtland Report: “Our Common Future.” *Medicine and War*, 4(1), 17–25. <https://doi.org/10.1080/07488008808408783>
- Kelso, A. (2019, 12 Juli). Food delivery via drones may be closer than you think. *Forbes*. <https://bit.ly/3pTnC6>
- Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia. (2021, 7 Mei). *Jurus menghadapi penolakan produk perikanan Indonesia di pasar global*. <https://bit.ly/3mEFgii>
- Kementerian Keuangan Republik Indonesia. (2021, 8 Juli). *Pemerintah bekerja keras naikan pendapatan per kapita*. <https://bit.ly/33SEkQX>

- Keogh, J. G., Rejeb, A., Khan, N., Dean, K., & Hand, K. J. (2020). Optimizing global food supply chains: The case for blockchain and GSI standards. Dalam: Datwiler, D. (Ed.), *Building the Future of Food Safety Technology: Blockchain and Beyond*. Academic Press, 43–54.
- Kerry, J. P., O’Grady, M. N., & Hogan, S. A. (2006). Past, current and potential utilisation of active and intelligent packaging systems for meat and muscle-based products: A review. *Meat Science*, 74(1), 113–130. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.04.024>
- Khan, S., Lorenzelli, L., & Dahiya, R. S. (2015). Technologies for printing sensors and electronics over large flexible substrates: A review. *IEEE Sensors Journal*, 15(6), 3164–3185. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2375203>
- Khosravi, M., Ali, N. I., Karbasi, M., Brohi, I. A., Shaikh, I. A., & Shah, A. (2018). Comparison between NFC/RFID and bar code systems for Halal tags identification: Paired sample T-test evaluation. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 9(4), 221–229. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2018.090435>
- Khot, L. R., Sankaran, S., Maja, J. M., Ehsani, R., & Schuster, E. W. (2012). Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: A review. *Crop Prot.* 35, 64–70.
- Kiel, D., Müller, J. M., Arnold, C., & Voigt, K. I. (2017). Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0. In *International Journal of Innovation Management*, 21(8). <https://doi.org/10.1142/S1363919617400151>
- Kim, H. M., & Laskowski, M. (2018). Agriculture on the Blockchain: Sustainable solutions for food, farmers, and financing. Dalam: Tapscoot, D. (Ed.), *Supply Chain Revolution*. Barrow Books. <https://ssrn.com/abstract=3028164>
- Kim, Y. S., Kim, J. S., Cho, H. S., Rha, D. S., Kim, J. M., Park, J. D., Choi, B. S., Lim, R., Chang, H. K., Chung, Y. H., Kwon, I. H., Jeong, J., Han, B. S., & Yu, I. J. (2008). Twenty-eight-day oral toxicity, genotoxicity, and gender-related tissue distribution of silver na-

- noparticles in Sprague-Dawley rats. *Inhalation Toxicology*, 20(6), 575–583. <https://doi.org/10.1080/08958370701874663>
- Kittipanya-ngam, P., & Tan, K. H. (2020). A framework for food supply chain digitalization: lessons from Thailand. *Production Planning and Control*, 31(2–3), 158–172. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1631462>
- Komisi Eropa. (2012). *COM(2014) 15 final: A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030*. 2014, 1–18.
- Komisi Eropa. (2014). Towards a Circular Economy: a Zero Waste Programme for Europe, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. European Commission, Brussels.
- Komisi Eropa. (2018). *Digitising European industry*. <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/policies/digitising-european-industry>
- Kopanos, G. M., Puigjaner, L., & Georgiadis, M. C. (2012). Simultaneous production and logistics operations planning in semi-continuous food industries. *Omega*, 40(5), 634–650. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2011.12.002>
- Kouhizadeh, M., Zhu, Q., & Sarkis, J. (2020). Blockchain and the circular economy: potential tensions and critical reflections from practice. *Production Planning and Control*, 31(11–12), 950–966. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1695925>
- Krajewski, L. J., Ritzman, L. P., & Malhotra, M. K. (2010). *Operations management: Processes and supply chains*. Pearson.
- Kshetri, N. (2018). 1 Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives. *International Journal of Information Management*, 39, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.12.005>
- Kulchan, R., Boonsupthip, W., Jinkarn, T., & Suppakul, P. (2016). Developing a novel colorimetric indicator for monitoring rancidity reaction and estimating the accelerated shelf life of oxygen-sensitive dairy products. *International Food Research Journal*, 23(3), 1092–1099.

- Kumar, M. V., & Iyengar, N. C. S. N. (2017). *A Framework for Blockchain Technology in Rice Supply Chain Management Plantation*. *June*, 125–130. <https://doi.org/10.14257/astl.2017.146.22>
- Kumar, S., & Ali, J. (2007). *e-Governance system (e-Choupal) and decision making process in agriculture*. *Developing E-Government*, 252–261.
- Kurtulmuş, F., & Kavdir, I. (2014). Detecting corn tassels using computer vision and support vector machines. *Expert Systems with Applications*, 41(16), 7390–7397. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.06.013>
- Kuswandi, B., Wicaksono, Y., Jayus, Abdullah, A., Heng, L. Y., & Ahmad, M. (2011). Smart packaging: Sensors for monitoring of food quality and safety. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 5(3–4), 137–146. <https://doi.org/10.1007/s11694-011-9120-x>
- Labels & Labelling. (2020, July 28). *Eltronis' Holographic Labels Battle Counterfeiters*. <https://bit.ly/3BgaOjL>
- Lambert, D. M., & Cooper, M. C. (2008). Issues in supply chain management in Indian agriculture. *Food for Policy*, 83, 195–225. <https://doi.org/10.1017/UPO9788175968462.008>
- Larsen, R. K., Osbeck, M., Dawkins, E., Tuhkanen, H., Nguyen, H., Nugroho, A., Gardner, T. A., Zulfahm, & Wolvekamp, P. (2018). Hybrid governance in agricultural commodity chains: Insights from implementation of 'No Deforestation, No Peat, No Exploitation' (NDPE) policies in the oil palm industry. *Journal of Cleaner Production*, 183(2018), 544–554. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.125>
- Law 9863 (2008), Retrieved September 11, 2021 from Albanian Institute of Public Health Web site: <https://www.fao.org/faolex/results/details/fr/c/LEX-FAOC083479/>
- Lee, H. L., & Whang, S. (2001). Winning the Last-mile of E-Commerce. *MIT Sloan Manag. Rev.* 42(4), 54–62.
- Le Roux, A., Bobrie, F., & Thébault, M. (2016). A typology of brand counterfeiting and imitation based on a semiotic approach. *Jour-*

- nal of Business Research*, 69(1), 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2015.08.007>
- Lecat, B., Brouard, J., & Chapuis, C. (2017). Fraud and counterfeit wines in France: an overview and perspectives. *British Food Journal*, 119(1), 84–104. <https://doi.org/10.1108/BFJ-09-2016-0398>
- Leone, L. (2017). Beyond Connectivity: The Internet of Food Architecture Between Ethics and the EU Citizenry. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 30(3), 423–438. <https://doi.org/10.1007/s10806-017-9675-6>
- Lezoche, M., Panetto, H., Kacprzyk, J., Hernandez, J. E., & Alemany Díaz, M. M. E. (2020). Agri-food 4.0: A survey of the Supply Chains and Technologies for the Future Agriculture. *Computers in Industry*, 117, 103187. <https://doi.org/10.1016/j.com-pind.2020.103187>
- Li, C. Z., Hong, J., Xue, F., Shen, G. Q., Xu, X., & Luo, L. (2016). SWOT analysis and Internet of Things-enabled platform for prefabrication housing production in Hong Kong. *Habitat International*, 57, 74–87. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.07.002>
- Li, Z., Wu, H., King, B., Ben Miled, Z., Wassick, J., & Tazelaar, J. (2018). A Hybrid Blockchain Ledger for Supply Chain Visibility. *Proceedings - 17th International Symposium on Parallel and Distributed Computing, ISPDC 2018*, 118–125. <https://doi.org/10.1109/ISPDC2018.2018.00025>
- Lin, Y. P., Petway, J. R., Anthony, J., Mukhtar, H., Liao, S. W., Chou, C. F., & Ho, Y. F. (2017). Blockchain: The evolutionary next step for ICT e-agriculture. *Environments - MDPI*, 4(3), 1–13. <https://doi.org/10.3390/environments4030050>
- Lipton, J., Arnold, D., Nigl, F., Lopez, N., Cohen, D., Norén, N., & Lipson, H. (2010). Mutli-material food printing with complex internal structure suitable for conventional post-processing. *21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2010, March*, 809–815.
- Liu, Z., Choo, K. K. R., & Zhao, M. (2017). Practical-oriented protocols for privacy-preserving outsourced big data analysis: Chal-

- lenges and future research directions. *Computers and Security*, 69, 97–113. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2016.12.006>
- Long, T. C., Saleh, N., Tilton, R. D., & Gregory, V. (2006). *Titanium Dioxide (P25) Produces Reactive Oxygen Species in Implications for Nanoparticle*. 40(14).
- Lopes de Sousa Jabbour, A. B., Jabbour, C. J. C., Godinho Filho, M., & Roubaud, D. (2018). Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. *Annals of Operations Research*, 270(1–2), 273–286. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2772-8>
- Lu, W. Y., Jiang, Q. Q., Shi, H. M., Niu, Y. G., Gao, B. Y., & Yu, L. L. (2014). Partial least-squares-discriminant analysis differentiating Chinese wolfberries by UPLC-MS and flow injection mass spectrometric (FIMS) fingerprints. *J. Agric. Food Chem.* 62, 9073–80
- Lucena, P., Binotto, A. P. D., Momo, F. da S., & Kim, H. (2018). *A Case Study for Grain Quality Assurance Tracking based on a Blockchain Business Network*. <http://arxiv.org/abs/1803.07877>
- M. (2014). The 3D fruit printer and the raspberry that tasted like a strawberry. <https://3dprintingindustry.com/news/3d-fruit-printer-raspberry-tasted-like-strawberry-27713/>
- MacCarthy, B. L., Blome, C., Olhager, J., Srari, J. S., & Zhao, X. (2016). Supply chain evolution – theory, concepts and science. *International Journal of Operations and Production Management*, 36(12), 1696–1718. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-02-2016-0080>
- Machado, C. G., Winroth, M. P., & Ribeiro da Silva, E. H. D. (2020). Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1462–1484. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1652777>
- Magnifier Research. (2020). Global robotics milking systems market 2020 with (Covid-19) 704 impact analysis, product type, application, key manufacturers, regions and forecast to 705 2025. <https://www.magnifierresearch.com/report/global706robotics-milking-systems-market-report-2020-forecast-33211.html> (Accessed 15 September 2021)

- Magnuson, B. A., Jonaitis, T. S., & Card, J. W. (2011). A brief review of the occurrence, use, and safety of food-related nanomaterials. *Journal of Food Science*, 76(6), 126–133. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02170.x>
- Majeed, M. A. A., & Rupasinghe, T. D. (2017). Internet of things (IoT) embedded future supply chains for industry 4.0: An assessment from an ERP-based fashion apparel and footwear industry. *International Journal of Supply Chain Management*, 6(1), 25–40.
- Majid, I., Ahmad Nayik, G., Mohammad Dar, S., & Nanda, V. (2018). Novel food packaging technologies: Innovations and future prospective. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(4), 454–462. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.11.003>
- Maksud, M. I., Yusof, M. S., & Jamil, M. M. A. (2012). Study on Finite Element Analysis of Fine Solid Lines by Flexographic Printing in Printed Antennas for RFID Transponder. *International Journal of Integrated Engineering*, 4(3), 35–39.
- Malak-Rawlikowska, A., Majewski, E., Was, A., Borgen, S. O., Csillag, P., Donati, M., Freeman, R., Hoàng, V., Lecoœur, J. L., Mancini, M. C., Nguyen, A., Saïdi, M., Tocco, B., Török, Á., Veneziani, M., Vittersø, G., & Wavresky, P. (2019). Measuring the economic, environmental, and social sustainability of short food supply chains. *Sustainability (Switzerland)*, 11(15). <https://doi.org/10.3390/su11154004>
- Mamun, M. R. A., & Kim, D. (2018). The effect of perceived innovativeness of student response systems (SRSS) on classroom engagement. Dalam: *Twenty-fourth Americas Conference on Information Systems, New Orleans, 2018*.
- Manavalan, E., & Jayakrishna, K. (2019). A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers and Industrial Engineering*, 127, 925–953. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.030>
- Mantihal, S., Kobun, R., & Lee, B. B. (2020). 3D food printing of as the new way of preparing food: A review. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 22, 100260. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2020.100260>

- Mao, D., Wang, F., Hao, Z., & Li, H. (2018). Credit evaluation system based on blockchain for multiple stakeholders in the food supply chain. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/ijerph15081627>
- Margherita, E. G., & Braccini, A. M. (2020). Organizational Impacts on Sustainability of Industry 4.0: A Systematic Literature Review from Empirical Case Studies. *Lecture Notes in Information Systems and Organisation*, 38, 173–186. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47355-6_12
- Marketing Charts (2013). QR Code Scanning Isn't Just A Young Person's Activity. <http://www.marketingcharts.com/online/qr-code-scanning-no-longer-just-for-young-people-29074/>
- Martin, P. (2017). Trump, immigration, and agriculture. *Choices*, 32(1), 1–5.
- Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B., & Hrsg, H. W. (2015). Autonomes Fahren. Dalam: *Lecture Notes in Computer Science (including sub-series Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* 9403. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25159-2_7
- McClements, D. J., Barrangou, R., Hill, C., Kokini, J. L., Lila, M. A., Meyer, A. S., & Yu, L. (2021). Building a Resilient, Sustainable, and Healthier Food Supply through Innovation and Technology. *Annual Review of Food Science and Technology*, 12, 1–28. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-092220-030824>
- Meadows, D. (1999). *Leverage Points Places to Intervene in a System*. The Sustainability Institute.
- Mena, C., Adenso-Diaz, B., & Yurt, O. (2011). The causes of food waste in the supplier-retailer interface: Evidences from the UK and Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(6), 648–658. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.09.006>
- Merriam-Webster, (2004). The Merriam-Webster Dictionary – New Edition.
- Mikkola, M. (2008). Coordinative structures and development of food supply chains. *British Food Journal*, 110(2), 189–205. <https://doi.org/10.1108/00070700810849907>

- Mohamad, M. A., Mansor, S., Ahmad, N., Adnan, W. A. W., & Muhammad Wali, I. (2016). The reliability of halal product transportation using gps tracking system. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 90(2), 188–196.
- Mohammed, A., Wang, Q., & Li, X. (2017). A study in integrity of an RFID-monitoring HMSC. *International Journal of Food Properties*, 20(5), 1145–1158. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1203933>
- Mohan, T. (2018). Improve Food Supply Chain Traceability Using Blockchain. *New England Journal of Medicine*, 372(2), 2499–2508. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7556065><http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC394507><http://dx.doi.org/10.1016/j.humphath.2017.05.005><https://doi.org/10.1007/s00401-018-1825-z><http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27157931>
- Morales-de la Pena, M., Welti-Chanes, J., & Martin-Belloso, O. (2019). Novel technologies to improve food safety and quality. *Curr. Opin. Food Sci.* 30, 1–7
- Morozov, E. (2013). *To save everything, click here: The folly of technological solutionism*, 1 ed. PublicAffairs.
- Mundi, I., Alemany, M. M. E., Poler, R., & Fuertes-Miquel, V. S. (2019). Review of mathematical models for production planning under uncertainty due to lack of homogeneity: proposal of a conceptual model. *International Journal of Production Research*, 57(15–16), 5239–5283. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1566665>
- Mundler, P., & Laughrea, S. (2016). The contributions of short food supply chains to territorial development: A study of three Quebec territories. *Journal of Rural Studies*, 45, 218–229. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2016.04.001>
- MWPVL International, Côte Saint-Luc, QC, Canada. (2020). Online Grocery Order Fulfillment Cost Comparison. <https://bit.ly/3yPf5ZL>.
- Nadal, A., Alamús, R., Pipia, L., Ruiz, A., Corbera, J., Cuerva, E., Rieradevall, J., & Josa, A. (2017). Urban planning and agriculture. Methodology for assessing rooftop greenhouse potential

- of non-residential areas using airborne sensors. *Science of the Total Environment*, 601–602, 493–507. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.214>
- Nagy, J., Oláh, J., Erdei, E., Máté, D., & Popp, J. (2018). The role and impact of industry 4.0 and the internet of things on the business strategy of the value chain-the case of hungary. *Sustainability (Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/su10103491>
- Nakajima, N. (2000). A vision of industrial ecology: State-of-the-art practices for a circular and service-based economy. *Bulletin of Science, Technology and Society*, 20(1), 54–69. <https://doi.org/10.1177/027046760002000107>
- Nakasumi, M. (2017). Information sharing for supply chain management based on block chain technology. *Proceedings - 2017 IEEE 19th Conference on Business Informatics, CBI 2017*, 1, 140–149. <https://doi.org/10.1109/CBI.2017.56>
- Nasir, M., Norman, A., Fauzi, S., & Azmi, M. (2011). An RFID-based validation system for Halal Food. *International Arab Journal of Information Technology*, 8(2), 204–211.
- Neethirajan, S., & Jayas, D. S. (2007). Sensors for grain storage. Dalam: *2007 ASABE Annual International Meeting, Technical Papers, 12 BOOK(076179)*. <https://doi.org/10.13031/2013.23510>. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- NAFDAC. (2011). Counterfeit and Fake Drugs and Unwholesome Processed Foods (Miscellaneous Provisions) ACT Cap C . 34 LFN.
- Nguyen Dang Tuan, M., Nguyen Thanh, N., & Le Tuan, L. (2019). Applying a mindfulness-based reliability strategy to the Internet of Things in healthcare – A business model in the Vietnamese market. *Technological Forecasting and Social Change*, 140, 54–68. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.10.024>
- Nobre, G. C., & Tavares, E. (2017). Scientific literature analysis on big data and internet of things applications on circular economy: a bibliometric study. *Scientometrics*, 111(1), 463–492. <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2281-6>

- Noone, B. M., & Coulter, R. C. (2012). Applying modern robotics technologies to demand prediction and production management in the quick-service restaurant sector. *Cornell Hospitality Quarterly*, 53(2), 122–133. <https://doi.org/10.1177/1938965511434112>
- Nygaard, U. C., Hansen, J. S., Samuelsen, M., Alberg, T., Marioara, C. D., & Løvik, M. (2009). Single-walled and multi-walled carbon nanotubes promote allergic immune responses in mice. *Toxicological Sciences*, 109(1), 113–123. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfp057>
- OECD, Office of Economic Cooperation and Development. (2008). Examining the economic effects of counterfeiting and piracy. Dalam *The Economic Impact of Counterfeiting and Piracy*. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264045521-6-en> (Chapter 5).
- OECD. (2009). Eco-Innovation: Framework, Practices and Measurement. Sustainable Manufacturing and Eco-Innovation: Synthesis Report Framework, Practices and Measurement
- Oglethorpe, D., & Heron, G. (2013). Testing the theory of constraints in UK local food supply chains. *International Journal of Operations and Production Management*, 33(10), 1346–1367. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-05-2011-0192>
- Öhgren, A. (2004). *Ontology Development and Evolution: Selected Approaches for Small-Scale Application Contexts*. ISSN 1404-0018;2004:7. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:4295/FULLTEXT01.pdf>
- Olsson, H. H., Bosch, J., & Katumba, B. (2016). Exploring IoT user dimensions: A multicase study on user interactions in ‘internet of things’ systems. *Product-focused software process improvement: 17th International Conference, PROFES 2016, Trondheim, Norway, November 22–24, 2016, Proceedings 17* (477–484). Springer International Publishing.
- Oosterveer, P. (2015). Promoting sustainable palm oil: Viewed from a global networks and flows perspective. *Journal of Cleaner Production*, 107, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.019>

- Oropallo, W., & Piegl, L. A. (2016). Ten challenges in 3D printing. *Engineering with Computers*, 32(1), 135–148. <https://doi.org/10.1007/s00366-015-0407-0>
- Ørtenblad, S. B., Larsen, M. N., & Suebpongsang, P. (2020). Multi-dimensional dynamics and spatial connections in food retail markets in Thailand. *Geografiska Annaler, Series B: Human Geography*, 102(1), 40–60. <https://doi.org/10.1080/04353684.2020.1715811>
- Oskay, W. (2009, 27 Mei). The CandyFab 6000. *Evil Mad Scientist*. <https://www.evilmadscientist.com/2009/the-candyfab-6000/>
- Otles, S., & Sahyar, B. Y. (2016). Intelligent Food Packaging. *Comprehensive Analytical Chemistry*, 74, 377–387. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2016.04.010>
- Ottenbacher, M. C., & Harrington, R. J. (2009). The product innovation process of quick-service restaurant chains. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 21(5), 523–541. <https://doi.org/10.1108/09596110910967782>
- Paciarotti, C., & Torregiani, F. (2018). Short food supply chain between micro/small farms and restaurants: An exploratory study in the Marche region. *British Food Journal*, 120(8), 1722–1734. <https://doi.org/10.1108/BFJ-04-2018-0253>
- Packing Supply. (2018, 18 Mei). Packing Supply. *Five Essential Features Every Tamper Proof Envelopes Must Have*. <https://bit.ly/3BcltM2>
- Pal, A., & Kant, K. (2018). IoT-Based Sensing and Communications Infrastructure for the Fresh Food Supply Chain. *IEEE*. https://doi.org/10.1007/springerreference_25120
- Pal, M. (2017). Nanotechnology: A New Approach in Food Packaging. *Journal of Food: Microbiology, Safety & Hygiene*, 02(02), 8–9. <https://doi.org/10.4172/2476-2059.1000121>
- Pallottino, F., Hakola, L., Costa, C., Antonucci, F., Figorilli, S., Seisto, A., & Menesatti, P. (2016). Printing on Food or Food Printing: a Review. *Food and Bioprocess Technology*, 9(5), 725–733. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1692-3>
- Panea, B., Ripoll, G., González, J., Fernández-Cuello, Á., & Albertí, P. (2014). Effect of nanocomposite packaging containing different

- proportions of ZnO and Ag on chicken breast meat quality. *Journal of Food Engineering*, 123, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.029>
- Pang, Z. (2013). *Technologies and Architectures of the Internet-of-Things (IoT) for Health and Well-being* (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology).
- Pant, L. (2016). Digitally Engaged Rural Community Development. *Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development*, 6(4), 1–3. <https://doi.org/10.5304/jafscd.2016.064.005>
- Papetti, A., Marconi, M., Rossi, M., & Germani, M. (2019). Web-based platform for eco-sustainable supply chain management. *Sustainable Production and Consumption*, 17, 215–228. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.11.006>
- Parvin, S., Gawanmeh, A., & Venkatraman, S. (2018). Optimised sensor based smart system for efficient monitoring of grain storage. *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops 2018 - Proceedings (1–6)*. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2018.8403537>
- Pasi, B. N., Mahajan, S. K., & Rane, S. B. (2020). The current sustainability scenario of Industry 4.0 enabling technologies in Indian manufacturing industries. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 70(5), 1017–1048. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-04-2020-0196>
- Paskin, B. (2017, 28 Februari). ‘Sophisticated’ fake whisky setup exposed. *Scotchwhisky.com*. <https://scotchwhisky.com/magazine/latest-news/12984/sophisticated-fake-whisky-setupexposed/>
- Pawelczyk, A. (2005). EU Policy and Legislation on recycling of organic wastes to agriculture. *ISAH*, 1, 64–71.
- PBB. (2017). *World Health Organization: WHO Model Lists of Essential Medicines*. <http://www.who.int/medicines/publications/essentialmedicines/en/index.html>.
- PBB. (2018, 16 Mei). 68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN. United Nations Department of Economic and Social Affairs. <https://bit.ly/3A2NG7O>

- PBB. (2018). *Goal 2: End hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2016/goal-02/>
- PBB. (2019). *World population prospects 2019: Highlights*. United Nations Department of Economic and Social Affairs, New York. https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf.
- Pekkanen, J., Peters, A., Hoek, G., Tiittanen, P., Brunekreef, B., De Hartog, J., Heinrich, J., Ibaldo-Mulli, A., Kreyling, W. G., Lanki, T., Timonen, K. L., & Vanninen, E. (2002). Particulate air pollution and risk of ST-segment depression during repeated submaximal exercise tests among subjects with coronary heart disease: The exposure and risk assessment for fine and ultrafine particles in ambient air (ULTRA) study. *Circulation*, 106(8), 933–938. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000027561.41736.3C>
- Peng, S., Su, G., Chen, J., & Du, P. (2017). Design of an IoT-BIM-GIS Based Risk Management System for Hospital Basic Operation. *Proceedings - 11th IEEE International Symposium on Service-Oriented System Engineering, SOSE 2017*, 69–74. <https://doi.org/10.1109/SOSE.2017.22>
- Pereira, Á., Villanueva-Rey, P., Vence, X., Moreira, M. T., & Feijóo, G. (2018). Fresh milk supply through vending machines: Consumption patterns and associated environmental impacts. *Sustainable Production and Consumption*, 15, 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.05.003>
- Periard, D., Schaal, N., Schaal, M., Malone, E., & Lipson, H. (2007). Printing food. *Pharmazeutische Zeitung*, 138(47), 564–574.
- Pinna, C., Ramundo, L., Sisca, F. G., Angioletti, C. M., Taisch, M., & Terzi, S. (2016). Additive Manufacturing applications within food industry: An actual overview and future opportunities. *Proceedings of the Summer School Francesco Turco, 13–15-Sept*, 18–24.
- Policy Commission on the Future of Farming and Food. (2002). *Farming and Food, a Sustainable Future*. . Cabinet Office, London.

- Ponemon Institute. (2011). *Second annual cost of cyber crime study*.
https://www.ponemon.org/local/upload/file/2011_2nd_Annual_Cost_of_Cyber_Crime_Study%20.pdf.
- Potyrailo, R. A., Nagra, N., Tang, Z., Mondello, F. J., Surman, C., & Morris, W. (2014). Food quality and safety. *Food Engineering Series*, 60(35), 175–190. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1378-7_7
- Poyatos-Racionero, E., Ros-Lis, J. V., Vivancos, J. L., & Martínez-Máñez, R. (2018). Recent advances on intelligent packaging as tools to reduce food waste. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3398–3409. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.075>
- Prahinski, C., & Kocabasoglu, C. (2006). Empirical research opportunities in reverse supply chains. *Omega*, 34(6), 519–532. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.01.003>
- Prilliadi, H., Zahraturrehmi, Diyanah, S. M., Hr, K. F. R. U., Mahardika, S. B., Ramadhan, M. A., Zahroh, Z. A., Subrata, B. A. G., Ketaren, A., Syukron, M., Anggriawan, R., Foenna, Y. G., & Tampubolon, H. U. O. (2021). *Indonesia Emas Berkelanjutan 2045: Kumpulan Pemikiran Pelajar Indonesia Sedunia Seri 10 Pangan*. <https://doi.org/10.14203/press.368>
- Punakivi, M., Yrjölä, H., & Holmström, J. (2001). Solving the last mile issue: Reception box or delivery box? *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 31(6), 427–439. <https://doi.org/10.1108/09600030110399423>
- Putri, S. A. (2018). Challenge to Enforce Food Safety Law and Regulation in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 175(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/175/1/012216>
- PwC. (2016). *Industry 4.0: Building the digital enterprise*, Pricewaterhousecoopers, <https://pwc.to/3x0wFsE>
- PWC. (2018). *Fourth Industrial Revolution for the Earth: Harnessing Artificial Intelligence for the Earth* (Issue January). <https://www.pwc.com/gx/en/sustainability/assets/ai-for-the-earth-jan-2018.pdf>

- Pye, A. (2014). *The Internet of Things: Connecting the Unconnected*. *Engineering & Technology*, 9(11), 64-64. <https://doi.org/10.1049/et.2014.1109>
- Qian, J., Dai, B., Wang, B., Zha, Y., & Song, Q. (2020). Traceability in food processing: problems, methods, and performance evaluations—a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 0(0), 1–14. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1825925>
- Qin, Y., Shi, L. H., Song, L., Stöttinger, B., & Tan, K. (Frank). (2018). Integrating consumers' motives with suppliers' solutions to combat Shanzhai: A phenomenon beyond counterfeit. *Business Horizons*, 61(2), 229–237. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.11.009>
- Qu, Y. J., Ming, X. G., Liu, Z. W., Zhang, X. Y., & Hou, Z. T. (2019). Smart manufacturing systems: State of the art and future trends. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(9–12), 3751–3768. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03754-7>
- Quinto, E. J., Caro, I., Villalobos-Delgado, L. H., Mateo, J., De-Mateo-Silleras, B., Redondo-Del-Rio, M. P. (2019). Food safety through natural antimicrobials. *Antibiotics*, 8(4), 208.
- Rahayu, W. P., Fardiaz, D., Kartika, G. D., Nababan, H., Fanaike, R., & Puspitasari, R. (2016). Estimation of economic loss due to food poisoning outbreaks. *Food Science and Biotechnology*, 25(1), 157–161. <https://doi.org/10.1007/s10068-016-0113-8>
- Rajeev, A., Pati, R. K., Padhi, S. S., & Govindan, K. (2017). Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 162, 299–314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.026>
- Ramachandraiah, K., Han, S. G., & Chin, K. B. (2015). Nanotechnology in meat processing and packaging: Potential applications - A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 28(2), 290–302. <https://doi.org/10.5713/ajas.14.0607>
- Ramadan, Z. B., Farah, M. F., & Mrad, M. (2017). An adapted TPB approach to consumers' acceptance of service-delivery drones. *Technology Analysis and Strategic Management*, 29(7), 817–828. <https://doi.org/10.1080/09537325.2016.1242720>

- Ramirez-Peña, M., Sánchez Sotano, A. J., Pérez-Fernandez, V., Abad, F. J., & Batista, M. (2020). Achieving a sustainable shipbuilding supply chain under I4.0 perspective. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118789. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118789>
- Rao, J. J., Chen, B. C., & McClements, D. J. (2019). Improving the efficacy of essential oils as antimicrobials in foods: mechanisms of action. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* 10, 365–387.
- Rashid, A., Asif, F. M. A., Krajnik, P., & Nicolescu, C. M. (2013). Resource conservative manufacturing: An essential change in business and technology paradigm for sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 57, 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.012>
- Reaidy, P. J., Gunasekaran, A., & Spalanzani, A. (2015). Bottom-up approach based on Internet of Things for order fulfillment in a collaborative warehousing environment. *International Journal of Production Economics*, 159, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.02.017>
- Redman, R. (2021, 13 Mei). Whole Foods, Amazon Fresh, FreshDirect step up distribution from AeroFarms. *Supermarket News*. <https://www.supermarketnews.com/produce-floral/whole-foods-amazon-fresh-freshdirect-step-distribution-aerofarms>
- Rejeb, A. (2018). Halal Meat Supply Chain Traceability based on HACCP, Blockchain and Internet of Things. *Acta Technica Jaurinensis*, 11(4), 218–247. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v11.n4.467>
- Rejeb, A., Keogh, J. G., Zailani, S., Treiblmaier, H., & Rejeb, K. (2020). Blockchain technology in the food industry: A review of potentials, challenges and future research directions. *Logistics*, 4(4), 27. <https://doi.org/10.3390/logistics4040027>
- Renting, H., Marsden, T. K., & Banks, J. (2003). Understanding alternative food networks: Exploring the role of short food supply chains in rural development. *Environment and Planning A*, 35(3), 393–411. <https://doi.org/10.1068/a3510>

- Research and Markets (2018). *The Global Brand Counterfeiting Report*. https://www.researchandmarkets.com/research/7j7l2n/global_brand?w=4
- Research and Markets. (2020). *5 Ways Drones Can Help in a Pandemic*. <https://bit.ly/3yoovuV>.
- Rhim, J. W., Park, H. M., & Ha, C. S. (2013). Bio-nanocomposites for food packaging applications. *Progress in Polymer Science*, 38(10–11), 1629–1652. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008>
- Robotics. (2017, 6 Januari). The robotics ecosystem: Startup funding by category broken down in one infographic. *CBINSIGHTS*. <https://bit.ly/3BLBYPA>
- Rockström, J. (2018, September). 5 transformational policies for a prosperous and sustainable world. *TED*. <https://bit.ly/3JwwI6g>
- Rogerson, M., & Parry, G. C. (2020). Blockchain: Case studies in food supply chain visibility. *Supply Chain Management*, 25(5), 601–614. <https://doi.org/10.1108/SCM-08-2019-0300>
- Rohmer, S. U. K., Gerdessen, J. C., & Claassen, G. D. H. (2019). Sustainable supply chain design in the food system with dietary considerations: A multi-objective analysis. *European Journal of Operational Research*, 273(3), 1149–1164. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.09.006>
- Rokugawa, H., & Fujikawa, H. (2015). Evaluation of a new Mailard reaction type time-temperature integrator at various temperatures. *Food Control*, 57, 355–361. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.05.010>
- Roos, G. (Ed.), 2017. *Technology-driven productivity improvements and the future of work: Emerging research and opportunities*. IGI Global.
- Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A., Chiaroni, D., & Terzi, S. (2020). Assessing relations between circular economy and industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1662–1687. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1680896>

- Rosas, J. C., Aguilar, J. A., Tripp-Barba, C., Espinosa, R., & Aguilar, P. (2017). A mobile-sensor fire prevention system based on the internet of things. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10409 LNCS, 274–283. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62407-5_19
- Rotz, S., Gravely, E., Mosby, I., Duncan, E., Finnis, E., Horgan, M., LeBlanc, J., Martin, R., Neufeld, H. T., Nixon, A., Pant, L., Shalla, V., & Fraser, E. (2019). Automated pastures and the digital divide: How agricultural technologies are shaping labour and rural communities. *Journal of Rural Studies*, 68, 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.01.023>
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Philipp, G., Waldner, M., Pascal, J.J., Harnisch, E. and Harnisch, M. (2015, 9 April). Industry 4.0: the future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston Consulting Group*, 9(1), 54–89. www.bcgperspectives.com/content/articles/engineered_products_project_business_industry_40_future_productivity_growth_manufacturing_industries/.
- Saba, T. (2017). Halal food identification with neural assisted enhanced RFID antenna. *Biomedical Research (India)*, 28(18), 7760–7762.
- SafeProof. (2018). *Refilling liquor bottles*. <https://www.safeproof.org/refilling-liquor-bottles/>.
- Salaamgateway. (2018). *State of the Global Islamic Economy Report 2018/19: Islamic Economy Marks Steady Growth*. <https://www.salaamgateway.com/story/state-of-the-global-islamic-economy-report-201819-islamic-economy-marks-steady-growth>.
- Salah, K., Nizamuddin, N., Jayaraman, R., & Omar, M. (2019). Blockchain-based soybean traceability in agricultural supply chain. *IEEE Access*, 7, 73295–73305. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2918000>
- Sandåker, A. (2018). Sustainable supply chain management for blue economics in Northern Norway. (*Master's Thesis*, UiT Norges Arktiske Universitet).
- Sanislav, T., Zeadally, S., & Mois, G. D. (2017, 26 April). A cloud-integrated, multilayered, agent-based cyber-physical system

- architecture. *Computer*, 50(4), 27–37. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/MC.2017.113>
- Satpute, P., & Mohanpukar, A. (2015). Cloud centric IoT framework for supply chain management. *International Journal of Computer Applications*, 118(15), 19–22. <https://doi.org/10.5120/20822-3446>
- Schaefer, D., & Cheung, W. M. (2018). Smart packaging: Opportunities and challenges. *Procedia CIRP*, 72, 1022–1027. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.240>
- Schaub, A., Bazin, R., Hasan, O., & Brunie, L. (2016). A trustless privacy-preserving reputation system. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 471, 398–411. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33630-5_27
- Schierhorn, F., & Elferink, M. (2016). Global demand for food is rising. Can we meet it? *Harvard Business Review*, 7(May), 2016. https://www.researchgate.net/profile/Florian-Schierhorn/publication/302466629_Global_Demand_for_Food_Is_Rising_Can_We_Meet_It/links/57309c1c08ae08415e6a758a/Global-Demand-for-Food-Is-Rising-Can-We-Meet-It.pdf%0Ahttps://hbr.org/2016/04/global-demand-for-fo
- Schroeder, A., Ziaee Bigdeli, A., Galera Zarco, C., & Baines, T. (2019). Capturing the benefits of industry 4.0: A business network perspective. *Production Planning and Control*, 30(16), 1305–1321. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1612111>
- Schuetz, C. G., Schausberger, S., & Schrefl, M. (2018). Building an active semantic data warehouse for precision dairy farming. *Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce*, 28(2), 122–141. <https://doi.org/10.1080/10919392.2018.1444344>
- Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C., & Ranganathan, J. (2019). Creating a sustainable food future: A menu of solutions to feed nearly 10 billion people by 2050. *World Resources Report*, July, 558.
- Sebastian, H. J., & Voss, S. (2015). Introduction to intelligent decision support for logistics and supply chain management minitrack. *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on*

- System Sciences*, 2015-March, 1048. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2015.652>
- Secor, E. B., Prabhumirashi, P. L., Puntambekar, K., & Geier, M. L. (2013). *Supporting information for: Inkjet printing of high conductivity, flexible graphene patterns*. 1–7.
- Seebode, D., Jeanrenaud, S., & Bessant, J. (2012). Managing innovation for sustainability. *R & D Management*, 42(3), 195–206. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9310.2012.00678.x.573>
- Sellitto, M. A., Vial, L. A. M., & Viegas, C. V. (2018). Critical success factors in Short Food Supply Chains: Case studies with milk and dairy producers from Italy and Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1361–1368. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.235>
- Serizawa, R., Shitara, M., Gong, J., Makino, M., Kabir, M. H., & Furukawa, H. (2014). 3D jet printer of edible gels for food creation. *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites 2014*, 9058, 80–85. <https://doi.org/10.1117/12.2045082>
- Severini, C., Derossi, A., & Azzollini, D. (2016). Variables affecting the printability of foods: Preliminary tests on cereal-based products. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 38, 281–291. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.10.001>
- Sey, A., & Fellows, M. (2009). *Literature review on the impact of public access to information and communication technologies: CIS working paper no. 6. August 2015*.
- Sey, A., & Fellows, M. (2009). Literature Review on the Impact of Public Access to Information and Communication Technologies. *CIS working paper/Center for Information and Society, University of Washington; no. 6*.
- Shah, R. Y., Prajapati, P. N., & Agrawal, Y. K. (2014). Anticounterfeit packaging technologies. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology and Research*, 1(4), 368–373. <https://doi.org/10.4103/0110-5558.76434>
- Shahid, A., Almogren, A., Javaid, N., Al-Zahrani, F. A., Zuair, M., & Alam, M. (2020). Blockchain-based agri-food supply chain:

- A complete solution. *IEEE Access*, 8, 69230–69243. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2986257>
- Shams, R., Alpert, F., & Brown, M. (2015). Consumer perceived brand innovativeness: conceptualization and operationalization. *European Journal of Marketing* 49(9), 1589–1615.
- Shand, C. A., Wendler, R., Dawson, L., Yates, K., & Stephenson, H. (2017). Multivariate analysis of Scotch whisky by total reflection x-ray fluorescence and chemometric methods: A potential tool in the identification of counterfeits. *Analytica Chimica Acta*, 976, 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.04.041>
- Sharma, A., Zanotti, P., & Musunur, L. P. (2020). Drive through Robotics: Robotic Automation for Last Mile Distribution of Food and Essentials during Pandemics. *IEEE Access*, 8, 127190–127219. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007064>
- Sharma, R., & Parhi, S. (2018). A review on use of big data in warehousing to enhance accessibility of food. *Proceedings of the 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems, ICCES*, 663–667. <https://doi.org/10.1109/CESYS.2017.8321162>
- Sheth, A., Jaimini, U., & Yip, H. Y. (2018). How will the Internet of Things enable augmented personalized health? *IEEE Intelligent Systems*, 33(1), 89–97. <https://doi.org/10.1109/MIS.2018.012001556>
- Shrouf, F., Ordieres, J., & Miragliotta, G. (2014). Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 697–701. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2014.7058728>
- Shu, L. H., Duflou, J., Herrmann, C., Sakao, T., Shimomura, Y., De Bock, Y., & Srivastava, J. (2017). Design for reduced resource consumption during the use phase of products. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66(2), 635–658. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.06.001>
- Shveda, K. (2020). How coronavirus is changing grocery shopping. *BBC*. <https://www.bbc.com/future/bespoke/follow-the-food/how-covid-19-is-changing-food-shopping.html>

- Siegrist, M., Cousin, M. E., Kastenholz, H., & Wiek, A. (2007). Public acceptance of nanotechnology foods and food packaging: The influence of affect and trust. *Appetite*, 49(2), 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2007.03.002>
- Simon, M. (2017, June 12). San Francisco just put the brakes on delivery robots. *Wired*. <https://bit.ly/3jQsZXc>
- Singh, A. (2020, 4 Juni). DGCA allows Zomato, Swiggy, Dunzo to start testing drone deliveries for food. *The Week*. <https://bit.ly/3znwidM>.
- Sivathanu, B., & Pillai, R. (2018). Smart HR 4.0 – how industry 4.0 is disrupting HR. *Human Resource Management International Digest*, 26(4), 7–11. <https://doi.org/10.1108/HRMID-04-2018-0059>
- Skewis, T., & Lumelsky, V. (1994). Experiments with a mobile robot operating in a cluttered unknown environment. *Journal of Robotic Systems*, 11(4), 281–300. <https://doi.org/10.1002/rob.4620110405>
- SNCF (2017, 6 Juni). *How Blockchain simplifies waste disposal*. <https://www.digital.sncf.com/actualites/data-tritus-comment-la-blockchain-simplifie-le-tri-des-dechets>
- Snowdon, C. (2012, 22 Oktober). Drinking in the shadow economy. *IEA*. https://iea.org.uk/wp-content/uploads/2016/07/drinking%20in%20the%20Shadow%20Economy_0.pdf
- Song, L., Cherrett, T., McLeod, F., & Guan, W. (2009). Addressing the last-mile problem: Transport impacts of collection and delivery points. *Transportation Research Record*. 2097(1), 9–18.
- Sonnino, R., & Marsden, T. (2006). Beyond the divide: Rethinking relationships between alternative and conventional food networks in Europe. *Journal of Economic Geography*, 6(2), 181–199. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbi006>
- Sparling, D. (2007). *Development of value chain management as business practice: Value chain management (DVD)*. George Morris Centre.
- Spink, J., & Levente Fejes, Z. (2012). A review of the economic impact of counterfeiting and piracy methodologies and assessment of currently utilized estimates. *International Journal of Comparative*

- and *Applied Criminal Justice*, 36(4), 249–271. <https://doi.org/10.1080/01924036.2012.726320>
- Spink, J., Moyer, D. C., Park, H., & Heinonen, J. A. (2013). Defining the types of counterfeiters, counterfeiting, and offender organizations. *Crime Science*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/2193-7680-2-8>
- Sutriyanto, E. (2017, June 20). Perdagangan Daging Alana serta Sosis Ilegal dan Tidak Sehat di Perbatasan. *Tribunnews*. <https://bit.ly/3euBFPP>
- Staake, T., Thiesse, F., & Fleisch, E. (2012). Business strategies in the counterfeit market. *Journal of Business Research*, 65(5), 658–665. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2011.03.008>
- Stock, T., Obenaus, M., Kunz, S., & Kohl, H. (2018). Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential. *Process Safety and Environmental Protection*, 118, 254–267. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.026>
- Stygar, A. H., Kristensen, A. R., & Makulska, J. (2014). Optimal management of replacement heifers in a beef herd: A model for simultaneous optimization of rearing and breeding decisions. *Journal of Animal Science*, 92(8), 3636–3649. <https://doi.org/10.2527/jas.2010-7535>
- Sugiyama, M., Deguchi, H., Ema, A., Kishimoto, A., Mori, J., Shiroyama, H., & Scholz, R. W. (2017). Unintended side effects of digital transition: Perspectives of Japanese experts. *Sustainability (Switzerland)*, 9(12), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su9122193>
- Sun, J., Zhou, W., Huang, D., Fuh, J. Y. H., & Hong, G. S. (2015). An Overview of 3D Printing Technologies for Food Fabrication. *Food and Bioprocess Technology*, 8(8), 1605–1615. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1528-6>
- Suprem, A., Mahalik, N., & Kim, K. (2013). A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector. *Computer Standards and Interfaces*, 35(4), 355–364. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2012.09.002>
- Takahashi, M., Nagata, M., & Miura, N. (2018). Supply-chain security enhancement by chaotic wireless chip-package-board

- interactive PUF. *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, 2018 Mei, 521–526. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2018.00082>
- TamperTechTeam. (2020, Oktober). *File: Security tamper evident label showing a void message when removed.jpg*. [Gambar]. Wikimedia Commons. <https://bit.ly/3B8XQEf>
- Tan, A., Gligor, D., & Ngah, A. (2020). Applying blockchain for halal food traceability. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 0(0), 1–18. <https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1825653>
- Tan, K. H., Ali, M. H., Makhbul, Z. M., & Ismail, A. (2017). The impact of external integration on halal food integrity. *Supply Chain Management*, 22(2), 186–199. <https://doi.org/10.1108/SCM-05-2016-0171>
- Tao, F., Cheng, Y., Xu, L. Da, Zhang, L., & Li, B. H. (2014). CCIoT-CMfg: Cloud computing and internet of things-based cloud manufacturing service system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(2), 1435–1442. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2306383>
- Tasca, A. L., Nessi, S., & Rigamonti, L. (2017). Environmental sustainability of agri-food supply chains: An LCA comparison between two alternative forms of production and distribution of endive in northern Italy. *Journal of Cleaner Production*, 140, 725–741. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.170>
- Tay, M. Z., Poh, C. M., Rénia, L., MacAry, P. A., & Ng, L. F. P. (2020). The trinity of Covid-19: immunity, inflammation and intervention. *Nature Reviews Immunology*, 20(6), 363–374. <https://doi.org/10.1038/s41577-020-0311-8>
- The Times. (2020, April 3). Drone flies to the rescue in first coronavirus food and drugs delivery. <https://bit.ly/3Bvm0Kl>
- Thierry, M., Salomon, M., van Nunen, J., & van Wassenhove, L. (1995). Strategic Issues in Product Recovery Management. *California Management Review*, 37(2), 114–135. <https://doi.org/10.2307/41165792>

- Thomas, D. J., & Griffin, P. M. (1996). Coordinated supply chain management. *European Journal of Operational Research*, 94(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(96\)00098-7](https://doi.org/10.1016/0377-2217(96)00098-7)
- Thomé, K. M., Cappelleso, G., Ramos, E. L. A., & de Lima Duarte, S. C. (2021). Food supply chains and short food supply chains: Coexistence conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123207. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123207>
- Tidy, J. (2019, 25 Juni). How a ransomware attack cost one firm £45m. *BBC News*. <https://www.bbc.com/news/business-48661152>.
- Todd, J. E., & Scharadin, B. (2016). Where households get food in a typical week: Findings from USDA's FoodAPS. *Economic Information Bulletin* 156. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service.
- Tomar, D. (2020, 23 April). Travelled from one hospital to another: Delhi Pizza Delivery Boy who tested Covid-19 positive shares ordeal. *India Today*. <https://bit.ly/3sWf70p>.
- Tonkinwise, C. (2015). Design for transitions - from and to what? *Design Philosophy Papers*, 13(1), 85–92. <https://doi.org/10.1080/14487136.2015.1085686>
- Torres-Duque, C., Maldonado, D., Pérez-Padilla, R., Ezzati, M., & Viegi, G. (2008). Biomass fuels and respiratory diseases: A review of the evidence. *Proceedings of the American Thoracic Society*, 5(5), 577–590. <https://doi.org/10.1513/pats.200707-100RP>
- Tortorella, G. L., & Fettermann, D. (2018). Implementation of industry 4.0 and lean production in brazilian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2975–2987. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1391420>
- Toyoda, K., Takis Mathiopoulos, P., Sasase, I., & Ohtsuki, T. (2017). A novel blockchain-based product ownership management system (POMS) for anti-counterfeits in the post supply chain. *IEEE Access*, 5(June), 17465–17477. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2720760>
- Tribis, Y., El Bouchti, A., & Bouayad, H. (2018). Supply chain management based on blockchain: A systematic mapping study.

- MATEC Web of Conferences*, 200. <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201820000020>
- Trivelli, L., Apicella, A., Chiarello, F., Rana, R., Fantoni, G., & Tarabella, A. (2019). From precision agriculture to Industry 4.0: Unveiling technological connections in the agrifood sector. *British Food Journal*, 121(8), 1730–1743. <https://doi.org/10.1108/BFJ-11-2018-0747>
- Tsakanikas, P., Pavlidis, D., & Nychas, G. J. (2015). High throughput multispectral image processing with applications in food science. *PLoS ONE*, 10(10), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140122>
- Tseng, M. L., Tan, R. R., Chiu, A. S. F., Chien, C. F., & Kuo, T. C. (2018). Circular economy meets industry 4.0: Can big data drive industrial symbiosis? *Resources, Conservation and Recycling*, 131(December 2017), 146–147. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.028>
- TT Aviation. (2018). *Fertilization and sowing drone*. <https://www.ttaviation.org/pro/fertilization-and-sowing-drone>
- Turri, A. M., Smith, R. J., & Kopp, S. W. (2017). Privacy and RFID technology: A review of regulatory efforts. *Journal of Consumer Affairs*, 51(2), 329–354. <https://doi.org/10.1111/joca.12133>
- UNEP. (2006). *Circular economy: An alternative model for economic development*.
- UPS (2015, 18 September). Proper packaging to prevent product loss. *eCommerceWeekly*. <http://www.ecommerceweekly.com/shipping/proper-packaging-to-prevent-product-loss/>
- Uríčková, V., & Sádecká, J. (2015). Determination of geographical origin of alcoholic beverages using ultraviolet, visible and infrared spectroscopy: A review. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 148, 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2015.03.111>
- Vanderroost, M., Ragaert, P., Devlieghere, F., & De Meulenaer, B. (2014). Intelligent food packaging: The next generation. *Trends in Food Science and Technology*, 39(1), 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.06.009>

- Verbeek, P. P. (2006). Materializing morality: Design ethics and technological mediation. *Science Technology and Human Values*, 31(3), 361–380. <https://doi.org/10.1177/0162243905285847>
- Venkatesh, V. G., Kang, K., Wang, B., Zhong, R. Y., & Zhang, A. (2020). System architecture for blockchain based transparency of supply chain social sustainability. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 63, 101896. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101896>
- Ventä, O. (2007). Intelligent products and systems: Technology theme - Final report. Dalam *VTT Publications* (Issue 635).
- Vijaykumar, S., Saravanakumar, S. G., & Balamurugan, M. (2015). Unique sense: Smart computing prototype. *Procedia Computer Science*, 50, 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.056>
- Vilsack, T. (2020, 19 Juni). Perspectives on Covid-19 and the food and agricultural system. *Presented at Covid-19 and the Food and Agricultural System, 19 Juni*. <https://www.nationalacademies.org/event/06-19-2020/covid-19-and-the-food-and-agricultural-system>
- Vinuesa, R., Azizpour, H., Leite, I., Balaam, M., Dignum, V., Domisch, S., Felländer, A., Langhans, S. D., Tegmark, M., & Fuso-Nerini, F. (2020). *The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals*. *Nature Communications*, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14108-y>
- Vittersø, G., Torjusen, H., Laitala, K., Tocco, B., Biasini, B., Csillag, P., de Labarre, M. D., Lecoœur, J. L., Maj, A., Majewski, E., Malak-Rawlikowska, A., Menozzi, D., Török, Á., & Wavresky, P. (2019). Short food supply chains and their contributions to sustainability: Participants' views and perceptions from 12 European cases. *Sustainability*, 11(17), 4800. <https://doi.org/10.3390/su11174800>
- Voigt, P., & von dem Bussche, A. (2017). *General data protection regulation*. Springer.
- Vukatana, K. (2016). Anti-counterfeiting technologies in Albanian food industry. *Review of Business & Finance Studies*, 7(2), 101–106. www.theIBFR.com

- Vukatana, K., Sevrani, K., & Hoxha, E. (2016). Wine traceability: A data model and prototype in albanian context. *Foods*, 5(1), 1–11. <https://doi.org/10.3390/foods5010011>
- Waibel, M. W., Steenkamp, L. P., Moloko, N., & Oosthuizen, G. A. (2017). Investigating the effects of smart production systems on sustainability elements. *Procedia Manufacturing*, 8, 731–737. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.094>
- Waldeck, N. E. (2014). *Advanced manufacturing technologies and workforce development*. Routledge.
- Walters, P, Huson, D, & Southerland, D. (2011). Edible 3D Printing. Dalam *Proceeding of 27th International Conference on Digital Printing Technologies*. USA, Minnesota.
- Wan, J., Tang, S., Shu, Z., Li, D., Wang, S., Imran, M., & Vasilakos, A. V. (2016). Software- defined industrial internet of things in the context of industry 4.0. *IEEE Sensors Journal*, 16(20), 7373–7380. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2565621>
- Wang, G., Gunasekaran, A., Ngai, E. W. T., & Papadopoulos, T. (2016). Big data analytics in logistics and supply chain management: Certain investigations for research and applications. *International Journal of Production Economics*, 176, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.03.014>
- Wang, L., Törngren, M., & Onori, M. (2015). Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 517–527. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.04.008>
- Wang, S., Tang, X., Zhang, Y., & Chen, J. (2019). Auditable protocols for fair payment and physical asset delivery based on smart contracts. *IEEE Access*, 7, 109439–109453. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933860>
- Wardhani, A. K. (2017, 3 March). Dianggap berbahaya untuk kesehatan, produksi pabrik saus sambal di Tangerang dihentikan BPOM. *Tribunnews*. <https://bit.ly/3ewz5c0>
- Warner, K., Timme, W., Lowell, B., & Hirschfield, M. (2013). Oceana study reveals seafood fraud nationwide. *Oceana*. <http://oceana>.

- org/reports/oceana-study-reveals-seafood-fraud-nationwide. (pp. 1–69).
- Waschulin, V., & Specht, L. (2018). Cellular agriculture: An extension of common production methods for food. *The Good Food Inst.*, Washington, DC. <https://www.gfi.org/images/uploads/2018/03/Cellular-Agriculturefor-Animal-Protein.pdf>
- WEF (World Economic Forum). (2019). *Innovation with a purpose: The role of technology innovation in accelerating food systems transformation*. http://www3.weforum.org/docs/WEF_Innovation_with_a_Purpose_VF-reduced.pdf
- Wegrzyn, T. F., Golding, M., & Archer, R. H. (2012). Food Layered Manufacture: A new process for constructing solid foods. *Trends in Food Science and Technology*, 27(2), 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.04.006>
- Whatmore, S. J., & Thorne, L. B. (1997). Nourishing networks: Alternative geographies of food. Dalam D. Goodman, & M. Watts (Ed.), *Globalising food: Agrarian questions and global restructuring* (287–304). Routledge.
- Wilcock, A. E., & Boys, K. A. (2014). Reduce product counterfeiting: An integrated approach. *Business Horizons*, 57(2), 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2013.12.001>
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L. J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., ... Murray, C. J. L. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
- Wimmer, H., & Yoon, V. Y. (2017). Counterfeit product detection: Bridging the gap between design science and behavioral science in information systems research. *Decision Support Systems*, 104, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2017.09.005>

- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Wong, J. C. (2017, 10 Desember). San Francisco Sourssours on rampant delivery robots: Not every innovation is great. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/us-news/2017/dec/10/san-francisco-delivery-robots-laws>
- Wong, L. W., Leong, L. Y., Hew, J. J., Tan, G. W. H., & Ooi, K. B. (2020). Time to seize the digital evolution: Adoption of blockchain in operations and supply chain management among Malaysian SMEs. *International Journal of Information Management*, 52, 101997. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.08.005>
- World Health Organization. (2010). Sixty-Third World Health Assembly - A63/23 - Counterfeit Medical Products. *Who*, A63/23(April), 7. http://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA63/A63_23-en.pdf
- World Health Organization. (2020). *WHO Coronavirus Disease (Covid-19) Dashboard*. <https://covid19.who.int/>
- World Resource Institute. (2018). Food loss & waste protocol addressing the challenges of quantifying food loss and waste. <https://www.wri.org/our-work/project/food-loss-waste-protocol>
- WTO. (1994). *Agreement on trade-related aspects of intellectual property rights, including trade in counterfeit goods*. https://www.wto.org/english/docs_e/legal_e/27-trips.pdf
- Wunderlich, S. M., & Martinez, N. M. (2018). Conserving natural resources through food loss reduction: Production and consumption stages of the food supply chain. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(4), 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.06.002>
- Wyser, Y., Adams, M., Avella, M., Carlander, D., Garcia, L., Pieper, G., Rennen, M., Schuermans, J., & Weiss, J. (2016). Outlook and challenges of nanotechnologies for food packaging by. *Packaging and Technology and Science*, 29, 615–648. <https://doi.org/10.1002/pts>

- Xerox. (2015). *Xerox launches printed memory products to combat counterfeiting*. <https://www.news.xerox.com/news/Xerox-Launches-Printed-Memory-to-Combat-Counterfeiting>.
- Xie, R. S., Wu, K. S., Xu, G. P., & Ouyang, M. (2013). Research on anti-counterfeiting quick response 2D barcode techniques based on digital watermark. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 18(4), 443–447. <https://doi.org/10.1007/s12204-013-1415-0>
- Xiong, X., Guardone, L., Cornax, M. J., Tinacci, L., Guidi, A., Gianfaldoni, D., & Armani, A. (2016). DNA barcoding reveals substitution of Sablefish (*Anoplopoma fimbria*) with Patagonian and Antarctic Toothfish (*Dissostichus eleginoides* and *D. mawsoni*) in online market in China: How mislabeling opens door to IUU fishing. *Food Control*, 70, 380–391.
- Xu, L. Da, He, W., & Li, S. (2014). Internet of things in industries: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4), 2233–2243. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2300753>
- Xu, M., Cai, H., & Liang, S. (2015). Big data and industrial ecology. *Journal of Industrial Ecology*, 19(2), 205–210. <https://doi.org/10.1111/jiec.12241>
- Yang, M. Y., Cousineau, A., Liu X. B., Luo, Y. G., & Sun, D. (2020.). Direct metatranscriptome RNA-seq and multiplex RT-PCR amplicon sequencing on nanopore MinION: Promising strategies for multiplex identification of viable pathogens in food. *Front. Microbiol.*, 11, 514.
- Yang, F. M., Li, H. M., Li, F., Xin, Z. H., Zhao, L. Y., Zheng, Y. H., & Hu, Q. H. (2010). Effect of nano-packing on preservation quality of fresh strawberry (*fragaria ananassa* duch. cv fengxiang) during storage at 4°C. *Journal of Food Science*, 75(3). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01520.x>
- Yang, H., Lee, H., & Zo, H. (2017). User acceptance of smart home services: An extension of the theory of planned behavior. *Industrial Management and Data Systems*, 117(1), 68–89. <https://doi.org/10.1108/IMDS-01-2016-0017>
- Yang, K. (2012). Consumer technology traits in determining mobile shopping adoption: An application of the extended theory of

- planned behavior. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 19(5), 484–491. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2012.06.003>
- Yang, L., Yang, S. H., & Plotnick, L. (2013). How the internet of things technology enhances emergency response operations. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(9), 1854–1867. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.07.011>
- Yin, Y., Stecke, K. E., & Li, D. (2018). The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 56(1–2), 848–861. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1403664>
- Yoshida, T., Yoshioka, Y., Fujimura, M., Yamashita, K., Higashisaka, K., Morishita, Y., Kayamuro, H., Nabeshi, H., Nagano, K., Abe, Y., Kamada, H., Tsunoda, S., Itoh, N., Yoshikawa, T. and Tsutsumi, Y. (2011). Promotion of allergic immune responses by intranasally-administrated nanosilica particles in mice”. *Nanoscale Research Letters*, 6(1), 1–6.
- Yu, Z., Yuan, Z., Lian, F., & Fu, M. (2010). A research of stored grain moisture detection based on RIS-K2 radar electromagnetic wave technology. *ICEIT 2010–2010 International Conference on Educational and Information Technology, Proceedings*, 3(Iceit), 265–267. <https://doi.org/10.1109/ICEIT.2010.5608377>
- Zadbuke, N., Shahi, S., Gulecha, B., Padalkar, A., & Thube, M. (2013). Recent trends and future of pharmaceutical packaging technology. *Journal of Pharmacy & Bioallied Sciences*, 5(2), 98.
- Zafar, S., Li, Y. L., Li, N. N., Zhu, K. M., & Tan, X. L. (2019). Recent advances in enhancement of oil content in oilseed crops. *Journal of Biotechnology*, 301, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2019.05.307>
- Zarei, M., Mohammadian, A., & Ghasemi, R. (2016). Internet of things in industries: A survey for sustainable development. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 10(4), 419–442. <https://doi.org/10.1504/IJISD.2016.079586>
- Zef, J. V. B., Beyene, B., Zef, C., Torero, M., Fao, C., Ifpri, D. L., & Iisd, C. S. (2020). *Ending hunger by 2030 – policy actions and costs*. 1–8.

- Zhang, L., Lou, Y., & Schutyser, M. A. I. (2018). 3D printing of cereal-based food structures containing probiotics. *Food Structure*, 18, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2018.10.002>
- Zhang, Q. (2015). *Precision agriculture technology agriculture technology for crop farming crop farming, 1st ed.* CRC Press and Taylor & Francis Group.
- Zhang, X., Qing, P., & Yu, X. (2019). Short supply chain participation and market performance for vegetable farmers in China. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 63(2), 282–306. <https://doi.org/10.1111/1467-8489.12299>
- Zhang, Y., Jiang, P., Huang, G., Qu, T., Zhou, G., & Hong, J. (2012). RFID-enabled real-time manufacturing information tracking infrastructure for extended enterprises. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(6), 2357–2366. <https://doi.org/10.1007/s10845-010-0475-3>
- Zhao, G., Liu, S., Lopez, C., Lu, H., Elgueta, S., Chen, H., & Boshkoska, B. M. (2019). Blockchain technology in agri-food value chain management: A synthesis of applications, challenges and future research directions. *Computers in Industry*, 109, 83–99. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.04.002>
- Zhou, H., Han, K., & Wei, X. (2015). Research on and realization of interactive wireless monitoring and management system of processed grain based on Web3D. *Proceedings - 2015 International Conference on Industrial Informatics - Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII)*, 194–200. <https://doi.org/10.1109/ICIICII.2015.131>
- Zinn, W., & Goldsby, T. J. (2019). Supply chain plasticity: Redesigning supply chains to meet major environmental change. *Journal of Business Logistics*, 40(3), 184–186. <https://doi.org/10.1111/jbl.12226>
- Zoran, A., & Coelho, M. (2011). Cornucopia: The concept of digital gastronomy. *Leonardo*, 44(5), 425–431.
- Zurich, E. T. H. (2007). *Anti-counterfeiting Requirements Report*. Building Radio frequency IDentification for the Global Environment.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



DAFTAR SINGKATAN

3DP	:	3 Dimensions Printing
AGV	:	Automated Guided Vehicle
AI	:	Artificial Intelligence
APD	:	Alat Pelindung Diri
AR	:	Augmented Reality
ASC	:	Agricultural Supply Chain
AVR	:	Augmented dan Virtual Reality
B2C	:	Business-to-Consumer
BCG	:	Boston Consulting Group
BDVA	:	The Big Data Value Association
CARDS	:	Community Assistance for Reconstruction, Development, and Stabilization
CNT	:	Call-in the Numeric Token
Cobot	:	Collaborative Robot

COTS	:	Commercial Off-The Shelf
CPPS	:	Cyber-Physical Production Systems
CPS	:	Cyber-Physical Systems
CSCM	:	Circular Supply Chain Management
CSI	:	Crowd-Sourced Innovation
DEM	:	Digital Elevation Model
DPoS	:	Delegate Proof of Stake
DSN	:	Digital Supply Network
E2E	:	End to End
EMR	:	Electronic Medical Record
EPC	:	Electronic Product Code
ERP	:	Enterprise Resource Planning
ETL	:	Extract, Transform, and Load
FAO	:	Food and Agriculture Organization
FDM	:	Fused Deposition Modeling
FLM	:	Food-Layered Manufacture
FoF	:	Factories of the Future
FSMS	:	Food Safety Management System
GAO	:	The U.S. Government Accountability Office
GDPR	:	The General Data Protection Regulation
GPS/GIS	:	Geographical Positioning System/Geographical Information System à Global Positioning System (GPS)/ Geographical Information Systems (GIS)
GRI	:	Global Report Initiative
GRK	:	Gas Rumah Kaca
GSCM	:	Green Supply Chain Management
GTIN	:	Global Trade Item Number
HACCP	:	Hazard Analysis and Critical Control Point
HAS	:	Hot Air Sintering
HFSC	:	Halal Food Supply Chain
HPC-CADM	:	High-Performance Computing-powered Computer-Aided Design and Manufacturing
IDS	:	Intrusion Detection System

IioT	: Industrial Internet of Things
IKEA	: Ingvar Kamprad Elmtaryd Agunnaryd
IMU	: Inertial Measurement Unit
IoP	: Internet of People
IoS	: Internet of Services
IoT	: Internet of Things
IPA	: Instrument for Pre-Accession Assistance
IPFS	: Interplanetary File Storage System
KE	: Knowledge Engineering
KEP	: Kekurangan Energi Protein
LCA	: Life-Cycle Assessment
LCC	: Life Cycle Costing
M2M	: Machine-to-Machine
MaaS	: Manufacturing as a Service
MIT	: Massachusetts Institute of Technology
MUI	: Majelis Ulama Indonesia
NAF-DAC	: National Agency for Food and Drug Administration and Control
NDPE	: No Deforestation, No Peat, No Exploitation
NFC	: Near Field Communication
NMRA	: National Medicines Regulatory Authority
NoSQL	: Not Only Structured Query Language
NTT	: Nusa Tenggara Timur
OECD	: Organization for Economic Cooperation and Development
OEM	: Original Equipment Manufacturer
PaaS	: Product as a Service
PbD	: Privacy by Default
PDO	: Protected Designation of Origin
PGI	: Protected Geographical Indication
PoS	: Proof of Stake
PoW	: Proof of Work

PUP	: Produk Ultra-Personalisasi
PwC	: PricewaterhouseCoopers
QR	: Quick Response
R2R	: Roll-to-Roll
RAS	: Robotics and Autonomous System
RDF	: Resource Description Framework
RFID	: Radio Frequency Identification
SFSCs	: Short Food Supply Chains
SLS	: Selective Laser Sintering
SSCM	: Sustainable Supply Chain Management
TPB	: Tujuan Pembangunan Berkelanjutan
TRA	: Theory of Reasoned Action
TRIPS	: Trade-Related Aspects of Intellectual Property Rights
TSG	: Traditional Specialty Guaranteed
TTI	: Temperature-Time Indicator
UAV	: Unmanned Aerial Vehicles
UE	: Uni Eropa
UKM	: Usaha Kecil dan Menengah
UNEP	: United Nations Environment Program
VCM	: Value Chain Management
VPD	: Virtual Product Development
WFP	: World Food Program
WRI	: World Resource Institute
WWF	: World Wildlife Foundation



GLOSARIUM

- Aditif : zat yang ditambahkan ke sesuatu dalam jumlah kecil untuk meningkatkan atau melestarikannya.
- Agregasi data : Proses mengumpulkan data dan menyajikannya dalam format yang diringkas. Data dapat dikumpulkan dari berbagai sumber dengan maksud menggabungkan sumber data ini menjadi ringkasan untuk analisis data.
- Agripreneurship : Agripreneurship mengacu pada kewirausahaan di bidang pertanian.
- Analitik prediktif : Penggunaan statistik dan teknik pemodelan untuk menentukan kinerja masa depan berdasarkan data saat ini dan historis.
- Antimikrob : Senyawa yang dapat menghambat pertumbuhan mikrob

- Audit** : The place or location where a business associate may be contacted or a facility may be located.
- Augmented reality* : Versi yang disempurnakan dari dunia fisik nyata yang dicapai melalui penggunaan elemen visual digital, suara, atau rangsangan sensorik lainnya yang disampaikan melalui teknologi.
- Bibliometrik** : Seperangkat metode untuk menganalisis literatur ilmiah dan teknologi secara kuantitatif.
- Biomassa** : Jumlah total atau berat organisme di area atau volume tertentu.
- Biomassa willow* : Sumber energi dan bioproduk terbarukan yang ramah lingkungan, diproduksi secara lokal.
- Biomolekul** : Senyawa kimia yang ditemukan dalam organisme hidup.
- Bioteknologi** : Teknologi yang menyangkut jasad hidup
- Bitcoin** : Jenis mata uang digital di mana catatan transaksi dipertahankan dan unit mata uang baru dihasilkan oleh solusi komputasi dari masalah matematika, dan yang beroperasi secara independen dari bank sentral.
- Brute force* : Mengandalkan atau dicapai melalui penerapan kekuatan, usaha, atau daya dalam jumlah besar daripada metode yang lebih efisien, direncanakan dengan hati-hati, atau diarahkan dengan tepat.
- Cryptocurrency* : Mata uang digital atau virtual yang dijamin dengan kriptografi sehingga hampir tidak mungkin untuk dipalsukan atau dibelanjakan ganda.

- Disruptif : Sebuah inovasi yang secara signifikan mengubah cara konsumen, industri, atau bisnis beroperasi.
- E-commerce* : Pembelian, penjualan, dan pemasaran barang, serta jasa melalui sistem elektronik.
- Ekonomi sirkular : Model produksi dan konsumsi, yang melibatkan berbagi, menyewakan, menggunakan kembali, memperbaiki, memperbarui, dan mendaur ulang bahan dan produk yang ada selama mungkin. Dengan cara ini, siklus hidup produk diperpanjang.
- Fermentasi etanol : Fermentasi alkohol adalah proses biologis yang mengubah gula seperti glukosa, fruktosa, dan sukrosa menjadi energi seluler, menghasilkan etanol dan karbon dioksida sebagai produk sampingan.
- Fotogrametri : Seni, ilmu pengetahuan, dan teknologi untuk memperoleh informasi yang dapat dipercaya tentang objek fisik dan lingkungan melalui proses perekaman, pengukuran, dan interpretasi gambar fotografi dan pola energi elektromagnetik pancaran yang direkam dan fenomena lainnya.
- Gas rumah kaca : Sejumlah gas yang menimbulkan efek rumah kaca yang terdapat di atmosfer bumi
- Gasifikasi : Teknologi yang dapat mengubah bahan baku karbon (berbasis karbon), seperti batu bara menjadi bahan bakar gas, juga dikenal sebagai gas sintesis (disingkat *syngas*)
- Genetically modified organism* : Organisme yang gen-gennya telah diubah dengan menggunakan teknik rekayasa genetika.

- Hyperledger* : Proyek *blockchain* perusahaan global yang menawarkan kerangka kerja, standar, pedoman, dan alat yang diperlukan untuk membangun *blockchain open-source* dan aplikasi terkait untuk digunakan di berbagai industri.
- Insinerasi : Pembakaran suhu tinggi (oksidasi cepat) dari limbah. Hal ini juga dikenal sebagai pembakaran atau kalsinasi api terkontrol dan merupakan teknologi yang menghancurkan konstituen organik dalam bahan limbah.
- Integrasi pasar : Istilah yang digunakan untuk mengidentifikasi fenomena pada saat pasar barang dan jasa terkait satu sama lain sehingga mengalami pola kenaikan atau penurunan yang serupa dalam hal harga produk tersebut.
- Interoperabilitas : Karakteristik produk atau sistem, yang antarmukanya dipahami sepenuhnya, untuk bekerja dengan produk atau sistem lain, saat ini atau di masa depan, baik dalam implementasi atau akses, tanpa batasan apa pun.
- Jaringan Bayesian : Model grafis probabilistik untuk mewakili pengetahuan tentang domain yang tidak pasti di mana setiap node sesuai dengan variabel acak dan setiap tepi mewakili probabilitas bersyarat untuk variabel acak yang sesuai.
- Jejak karbon : Jumlah karbon dioksida yang dilepaskan ke atmosfer sebagai akibat dari aktivitas individu, organisasi, atau komunitas tertentu.
- Karbonisasi hidrotermal : Juga disebut sebagai “karbonisasi berair pada suhu dan tekanan tinggi” adalah proses kimia untuk konversi senyawa organik menjadi karbon terstruktur.

- Kecerdasan Buatan : Teori dan pengembangan sistem komputer yang mampu melakukan tugas-tugas yang biasanya membutuhkan kecerdasan manusia, seperti persepsi visual, pengenalan ucapan, pengambilan keputusan, dan terjemahan antarbahasa.
- Kimia hijau : Cabang ilmu kimia yang menganjurkan desain produk dan proses kimia untuk mengurangi atau menghilangkan penggunaan dan pembentukan senyawa-senyawa berbahaya.
- Komposit nano : Material padat multifase dengan salah satu fase memiliki satu, dua, atau tiga dimensi kurang dari 100 nanometer (nm) atau struktur yang memiliki jarak pengulangan skala nano antara fase berbeda yang membentuk material.
- Komputasi awan : Gabungan pemanfaatan teknologi komputer (komputasi) dan pengembangan berbasis internet (awan).
- Komputasi Kinerja Tinggi : Kemampuan untuk memproses data dan melakukan perhitungan kompleks dengan kecepatan tinggi.
- Kromatografi : Teknik analisis yang pemisahan komponen berdasarkan pada perbedaan suatu sifat berpindah antara dua fase, fase yang satu bergerak dan fase yang lain diam
- Kromatografi gas-spektrometri massa : Platform yang umum digunakan untuk mengukur asam amino teroksidasi.
- Lockdown* : Langkah-langkah penjaan jarak fisik dan pembatasan pergerakan berskala besar
- Manufaktur : Penciptaan produk baru, baik dari bahan baku maupun komponen.

- Mikrobioma : Seluruh mikroba yang hidup di tubuh manusia, hewan, tumbuhan, tanah, dan sebagainya
- Mikroekstraksi fase padat : Teknik preparasi sampel yang efektif untuk mengintegrasikan beberapa operasi, seperti pengumpulan sampel, ekstraksi, pengayaan analit, dan isolasi dari matriks sampel, serta telah digunakan untuk mengekstrak analit dari sampel gas, cair, dan padat.
- Modularitas : Sejauh mana komponen sistem dapat dipisahkan dan digabungkan kembali, sering kali dengan manfaat fleksibilitas dan variasi penggunaan.
- Nanoteknologi : Ilmu dan rekayasa dalam menciptakan material, struktur fungsional, ataupun piranti alam skala nanometer.
- Linear-infrared spectroscopy* : Metode spektroskopi yang menggunakan daerah inframerah-dekat dari spektrum elektromagnetik (dari 780 nm hingga 2.500 nm).
- Node* : Titik perpotongan/koneksi dalam suatu jaringan komunikasi data.
- Pabrik pintar : Konsep yang digunakan untuk menggambarkan penerapan berbagai kombinasi teknologi modern untuk menciptakan kemampuan manufaktur yang hiperfleksibel dan beradaptasi sendiri. Pabrik pintar berpeluang untuk menciptakan bentuk efisiensi dan fleksibilitas baru dengan menghubungkan berbagai proses, aliran informasi, dan pemangku kepentingan (pekerja garis depan, perencana, dll.) secara efisien. Inisiatif pabrik pintar juga dapat disebut sebagai “pabrik digital” atau “pabrik cerdas”.

- Pembelajaran mesin : Penggunaan dan pengembangan sistem komputer yang mampu belajar dan beradaptasi tanpa mengikuti instruksi eksplisit, dengan menggunakan algoritma dan model statistik untuk menganalisis dan menarik kesimpulan dari pola dalam data.
- Pencernaan anaerobik : Penguraian limbah atau bahan limbah organik lainnya oleh mikroorganismen anaerobik biasanya digunakan sebagai sarana pembuangan limbah atau produksi energi.
- Pencitraan hiperspektral : Teknik yang menganalisis spektrum cahaya yang luas, bukan hanya menetapkan warna primer (merah, hijau, biru) untuk setiap piksel.
- Pertanian presisi : Konsep pertanian dengan pendekatan sistem untuk menuju pertanian dengan rendah masukan (*low-input*), efisiensi tinggi, dan pertanian berkelanjutan.
- Pertanian seluler : Pertanian dengan produksi produk berbasis hewani dari kultur sel dibandingkan langsung dari hewan.
- Pertanian vertikal : Praktik memproduksi makanan dan obat-obatan dalam lapisan yang ditumpuk secara vertikal, permukaan yang cenderung vertikal dan/atau terintegrasi dalam struktur lain (seperti gedung pencakar langit, gudang bekas, atau peti kemas).
- Pirolisis : Dekomposisi yang disebabkan oleh suhu tinggi.
- Planning horizon* : Jumlah waktu yang akan dilihat organisasi di masa depan ketika menyiapkan rencana strategis.

- Poin leverage* : Dalam pemikiran sistem, *poin leverage* adalah tempat dalam struktur sistem di mana elemen solusi dapat diterapkan. Ini adalah titik *leverage* yang rendah jika sejumlah kecil kekuatan perubahan menyebabkan perubahan kecil dalam perilaku sistem.
- Profitabilitas : Ukuran keuntungan organisasi relatif terhadap pengeluarannya.
- Protein alternatif : Berat Badan Lahir Rendah
- Pseudoniminasi : Situasi di mana pewarisan sifat resesif meniru pola dominan.
- Real-time : Waktu nyata yang menggambarkan berbagai operasi dalam komputasi atau proses lain yang harus menjamin waktu respons dalam waktu yang ditentukan (tenggat waktu); biasanya waktu yang relatif singkat.
- Rekayasa genetik : Suatu proses yang mengubah susunan genetik dari suatu organisme dengan menghapus atau memasukkan DNA
- Robot otonom : Sebuah robot yang menampilkan perilaku atau tugas dengan tingkat otonom yang tinggi, terutama dalam bidang-bidang, seperti penerbangan angkasa, tugas rumah tangga (seperti bersih-bersih), pengolahan air buangan, dan pengiriman barang dan jasa.
- Robotika cerdas : Kecerdasan buatan (AI) yang dapat belajar dari lingkungan dan pengalamannya serta membangun kemampuannya berdasarkan pengetahuan itu.

- Sensor cerdas : Perangkat yang mengambil input dari lingkungan fisik dan menggunakan sumber daya komputasi bawaan untuk melakukan fungsi yang telah ditentukan setelah mendeteksi input tertentu dan kemudian memproses data sebelum meneruskannya.
- Siklus hidup produk : Lamanya waktu dari produk pertama kali diperkenalkan kepada konsumen sampai dikeluarkan dari pasar.
- Spektroskopi : Alat untuk menguraikan cahaya menjadi spektrumnya.
- Start up* : Perusahaan yang masih dalam tahap awal bisnis. Sampai bisnis dimulai, sebuah *start up* sering kali dibiayai oleh pendirinya dan mungkin mencoba menarik investasi dari luar.
- Stokastik : Memiliki distribusi atau pola probabilitas acak yang dapat dianalisis secara statistik, tetapi tidak dapat diprediksi secara tepat.
- Supply Chain Management : Penanganan seluruh aliran produksi barang atau jasa — mulai dari komponen mentah hingga pengiriman produk akhir ke konsumen. Sebuah perusahaan menciptakan jaringan pemasok (“tautan” dalam rantai) yang memindahkan produk dari pemasok bahan mentah ke organisasi yang berhubungan langsung dengan pengguna.
- Trade-off* : Keseimbangan yang dicapai antara dua fitur yang diinginkan, tetapi tidak kompatibel; sebuah kompromi.

- Triple Bottom Line* : Di bidang ekonomi, *triple bottom line* (TBL) menyatakan bahwa perusahaan harus berkomitmen untuk berfokus pada masalah sosial dan lingkungan sebanyak keuntungan yang mereka dapatkan.
- Valorisasi : Pemulihan atau penetapan kembali nilai atau harga sesuatu
- Visi mesin : Jenis teknologi yang memungkinkan perangkat komputasi untuk memeriksa, mengevaluasi, dan mengidentifikasi gambar diam atau bergerak.
- Westernisasi : Adopsi praktik dan budaya Eropa Barat oleh masyarakat dan negara-negara di belahan dunia lain, baik melalui paksaan maupun pengaruh.



INDEKS

- 3DP, 466, 475, 480, 567
Aditif, 571
Agregasi data, 571
Agri-Food 4.0, 109
Agripreneurship, 571
AGV, 113, 567
AI, 33, 46, 47, 48, 50, 51, 53, 56,
58, 62, 63, 64, 65, 66, 114,
118, 261, 266, 267, 268, 269,
271, 272, 273, 275, 276, 277,
278, 279, 280, 281, 282, 283,
284, 285, 287, 288, 289, 387,
567, 578
AICAT, 569, 572
Analitik prediktif, 571
Antimikroba, 26, 571
Anti Pemalsuan, 331, 377
APD, 567
AR, 52, 567
ASC, 84, 567
Audit, 200, 572
Augmented reality, 38, 572
AVR, 33, 58, 59, 61, 65, 66, 567
B2C, 348, 350, 459, 567
BBLR, 578
BCG, 37, 313, 567
BDVA, 112, 567
Bibliometrik, 572
Big data, 50, 52, 124, 141, 142,
233, 244, 247, 302
Biomassa, 245, 253, 572
Biomassa willow, 572
Biomolekul, 572

Bioteknologi, 14, 17, 572
 Bitcoin, 180, 572
 Blockchain, 4, 64, 111, 124, 152,
 153, 173, 175, 181, 182, 183,
 193, 198, 200, 202, 204, 205,
 207, 208, 214, 216, 217, 218,
 282, 285
 Brute force, 572

 CARDS, 375, 567
 CNT, 316, 376, 567
 COBOT, 567
 COTS, 397, 398, 568
 CPPS, 57, 59, 62, 568
 CPS, 32, 44, 45, 46, 47, 50, 51, 53,
 140, 300, 439, 459, 568
 Cryptocurrency, 572
 CSCM, 80, 81, 568
 CSI, 55, 568

 DEM, 389, 398, 568
 Disruptif, 573
 DNA, 569
 DPOS, 174, 568
Drone, 283, 385, 387, 388, 389,
 393, 396, 397, 398, 399
 DSN, 64, 66, 568

 E2E, 63, 568
 E-commerce, 8, 573
 Ekonomi sirkular, 79, 573
 Ektoparasit, iv
 EMR, 568
 EPC, 168, 360, 377, 568

 ERP, 61, 64, 127, 130, 138, 568
 ETL, 250, 568

 FAO, 84, 85, 110, 264, 306, 308,
 568, 577
 FDM, 477, 568
 Fermentasi etanol, 573
 FLM, 466, 568
 FoF, 113, 568
 Fotogrametri, 399, 573
 FSMS, 89, 568

 GAO, 369, 568
 Gasifikasi, 573
 Gas rumah kaca, 573
 GDPR, 452, 453, 454, 456, 457,
 458, 459, 462, 463, 568
 Genetically modified organism,
 573
 GMO, 571
 GPS/GIS, 121, 568
Green Supply Chain Management,
 130, 568
 GRI, 48, 568
 GRK, 3, 4, 83, 84, 85, 568, 579
 GSCM, 130, 568
 GTIN, 568

 HACCP, 23, 163, 214, 216, 568
 HAS, 476, 568
 HFSC, 161, 162, 163, 164, 166,
 168, 169, 170, 171, 568
 HGU, 567
 HPC-CADM, 58, 61, 65, 568

Hyperledger, 185, 574

IDS, 568

IIoT, 56, 569

IKEA, 309, 569

IMU, 443, 569

Insinerasi, 574

Integrasi pasar, 574

Internet of Things, 20, 32, 69, 71, 79, 82, 105, 111, 113, 124, 127, 141, 161, 162, 183, 267, 282, 300, 303, 351, 397, 569

Interoperabilitas, 574

IoP, 59, 62, 569

IoS, 33, 58, 62, 569

IoT, 4, 32, 37, 38, 39, 40, 44, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 78, 81, 82, 105, 112, 113, 118, 127, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 149, 150, 151, 152, 153, 160, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 239, 267, 276, 282, 351, 386, 387, 390, 391, 392, 393, 397, 569

IPA, 375, 569

IPCC, 570, 578

IPFS, 174, 180, 569

IPM, 568, 575

IWMI, 575

Jaringan Bayesian, 574

Jejak karbon, 574

Karbonisasi hidrotermal, 574

KE, 244, 245, 252, 569

Keamanan pangan, 182, 368

Keberlanjutan, 13, 21, 22, 31, 33, 34, 39, 46, 48, 55, 57, 66, 72, 104, 242, 249, 263, 264, 266, 267, 306

Kecerdasan buatan, 261, 265, 275, 578

Kecerdasan Buatan, 19, 33, 111, 114, 261, 575

Kemasan cerdas, 295, 296, 302, 309, 321

KEP, 569, 578

Kimia hijau, 575

Komposit nano, 324, 575

Komputasi awan, 38, 47, 51, 575

Komputasi Kinerja Tinggi, 33, 575

Kromatografi, 575

Kromatografi gas-spektrometri massa, 575

LCA, 245, 246, 247, 248, 252, 253, 254, 255, 256, 258, 569

LCC, 254, 569

LEISA, 569, 578

Lockdown, 575

M2M, 140, 439, 460, 569

MaaS, 55, 569

Manajemen rantai pasok, 130

Manufaktur, 33, 36, 38, 49, 50, 61, 137, 141, 314, 488, 575

MIFEE, 567, 578

Mikrobioma, 576
 Mikroekstraksi fase padat, 312, 576
 MIT, 468, 477, 569
 Modularitas, 61, 576
 MP-ASI, 575
 MUI, 216, 569
 Murine typhus, iv

 NAFDAC, 354, 569
 Nanoteknologi, 18, 300, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 576
 NDPE, 96, 569
 NFC, 159, 165, 169, 349, 569
 NMRA, 356, 569
Nnear-infrared spectroscopy, 576
 Node, 576
 NoSQM, 569
 NTT, 569

 OECD, 355, 369, 370, 371, 372, 569
 OEM, 211, 213, 569
 OPT, 570

 PaaS, 55, 64, 569
 Pabrik pintar, 576
 PbD, 455, 569
 PDO, 106, 374, 569
 Pembelajaran mesin, 118, 282, 577
 Pencernaan anaerobik, 577
 Pencitraan hiperspektral, 577

 Pertanian presisi, 4, 233, 577
 Pertanian seluler, 15, 16, 577
 Pertanian vertikal, 21, 577
 PGI, 374, 569
 Pirolisis, 577
 Planning horizon, 577
 Poin leverage, 578
 PoS, 569
 PoW, 569
 Profitabilitas, 56, 578
 Protein alternatif, 3, 578
 Pseudoniminasi, 578
 PUP, 62, 570
 PwC, 37, 570

 QR, 26, 167, 347, 377, 378, 570

 R2R, 315, 317, 570
 Rantai Pasok Pertanian, 84, 120
 RAS, 570
 RDE, 250, 570
 Real-time, 578
 Rekayasa genetik, 4, 578
 RFID, 54, 131, 132, 138, 152, 159, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 186, 187, 294, 300, 310, 311, 313, 315, 316, 318, 347, 348, 349, 359, 361, 376, 377, 570
 Rickettsioses, iv
 Robotika, 9, 20, 111, 387, 578
 Robotika cerdas, 578
 Robot otonom, 578

RPJMN, 570, 573
 RPJPN, 568, 573

 Sensor cerdas, 579
 SFSCs, 86, 570
 Short Food Supply Chain, 83, 86,
 89, 570
 Siklus hidup produk, 579
 SLS, 476, 570
 Spektroskopi, 579
 SSCM, 79, 80, 82, 130, 570
 Startup, 579
 Stokastik, 579
 Supply Chain Management, 36,
 70, 79, 80, 87, 130, 175, 568,
 570, 579

 TPB, 89, 306, 570
 TRA, 570
 Trade-off, 579
 Triple Bottom Line, 40, 70, 580
 TRIPS, 333, 570

 TSG, 374, 570
 TTI, 310, 312, 313, 570

 UAV, 387, 388, 570
 UE, 106, 110, 374, 375, 377, 446,
 452, 453, 454, 457, 462, 570
 UKM, 77, 123, 203, 208, 209, 210,
 211, 212, 213, 215, 216, 217,
 218, 219, 287, 439, 570
 UNEP, 308, 570

 Valorisasi, 17, 248, 253, 580
 VCM, 123, 570
 Visi mesin, 580
 VPD, 61, 570

 Westernisasi, 264, 580
 WFP, 308, 570
 WRI, 309, 570
 WUS, 570
 WWF, 186, 570

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Biografi Penulis



Hilmy Prilliadi lulus S1 jurusan agrobisnis UMY tahun 2019. Sepanjang pendidikan sarjana pernah bertugas sebagai Ketua BEM Fakultas Pertanian periode 2017–2018 dan Wakil Presiden Mahasiswa UMY periode 2018–2019, meraih penghargaan sebagai mahasiswa berprestasi dan wisudawan terbaik universitas. Saat ini, ia sedang melaksanakan studi master ekonomi pertanian di Atatürk Üniversitesi, Erzurum, dengan

beasiswa Türkiye Burslari. Selama pendidikan master pernah bertugas sebagai Ketua Komisi Pangan Perhimpunan Pelajar Indonesia Sedunia (PPI Dunia) periode 2020–2021 dan Wakil Ketua PPI Turki periode 2021–2022. Beberapa publikasi terakhir: *Dampak Covid-19 pada Ekonomi Global Kini dan Pascapandemi* di Buletin Sabah. *Pusat Pangan Perkotaan: Masalah dan Solusi Akses Pangan ala Washington D.C.*; *Glokalisasi: Gaya Hidup Sustainable Pascapandemi*; serta

Buku ini tidak diperjualbelikan.

menjadi penulis dan editor buku *Indonesia Emas Berkelanjutan 2045: Kumpulan Pemikiran Pelajar Indonesia Sedunia. Seri 10: Pangan* yang diterbitkan oleh LIPI Press.

RANTAI PASOK PANGAN BERKELANJUTAN DENGAN PENERAPAN TEKNOLOGI INDUSTRI 4.0



Tersedianya beraneka ragam pangan yang terjangkau, dan bergizi merupakan ciri masyarakat yang sejahtera. Namun, populasi yang terus bertambah membuat tekanan pada pasokan pangan sehingga diperlukan teknologi digital dalam sistem rantai pasok pangan agar menjadi lebih terintegrasi secara global. Selain itu, karena terintegrasi secara global, penting untuk memastikan bahwa pasokan pangan dapat tahan terhadap guncangan ekonomi, politik, dan alam, seperti pandemi Covid-19.

Buku ini selain berusaha mengeksplorasi manfaat teknologi Industri 4.0 dalam membangun masa depan rantai pasok pangan yang berkelanjutan, juga membahas teknologi-teknologi disrupsi dan berbagai potensi solusi yang mampu diberikan oleh *Internet of Things* (IoT), *blockchain*, *big data*, kecerdasan buatan, sistem pengemasan pintar, teknologi anti-pemalsuan, *drone*, robotika, dan printer pangan 3D dalam sistem rantai pasok, termasuk pengiriman dan produksi pangan.

Buku ini diharapkan dapat bermanfaat bagi para akademisi, termasuk pelajar, pengusaha, pemerintah, dan semua pemangku kepentingan terkait sektor pertanian agar tercipta rantai pasok pangan yang berkelanjutan.



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie, Jln. M.H. Thamrin No. 8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: 0811-8612-369
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.go.id

DOI 10.55981/brin.470



I ISBN 978-623-8052-16-5

