



Editor:
Ibnu Fathrio
Danang Eko Nuryanto

Prediksi Iklim untuk Ketahanan Pangan

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Prediksi Iklim untuk Ketahanan Pangan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Diterbitkan pertama pada 2025 oleh Penerbit BRIN

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



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (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/>

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Editor:
Ibnu Fathrio
Danang Eko Nuryanto

Prediksi Iklim untuk Ketahanan Pangan

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Prediksi Iklim untuk Ketahanan Pangan/Ibnu Fathrio & Danang Eko Nuryyanto (Ed.)–Jakarta: Penerbit BRIN, 2025.

xx + 450 hlm.; 14,8 × 21 cm

ISBN 978-602-6303-49-3 (*e-book*)

- | | |
|--------------------|---------------------|
| 1. Perubahan iklim | 2. Ketahanan pangan |
| 3. Mitigasi | 4. Isu global |

551.6

Editor Akuisisi	: Indah Susanti
<i>Copy Editor</i>	: Emsa Ayudia Putri
<i>Proofreader</i>	: Annisa' Eskahita A., Martinus H., & Prapti Sasiwi
Penata Isi	: Rahma Hilma Taslima & Donna Ayu Savanti
Desainer Sampul	: Rahma Hilma Taslima
Edisi pertama	: Agustus 2025



Diterbitkan oleh:

Penerbit BRIN, Anggota Ikapi

Direktorat Reposisori, 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: +62 811-1064-6770

E-mail: penerbit@brin.go.id

Website: penerbit.brin.go.id

 PenerbitBRIN

 @Penerbit_BRIN

 @penerbit.brin

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Daftar Isi

Daftar Gambar.....	ix
Daftar Tabel.....	xv
Pengantar Penerbit.....	xvii
Prakata	xix
Bab I Sistem Prediksi Iklim dalam Rangkaian Kebutuhan untuk Penguatan Ketahanan Pangan	1
<i>Danang Eko Nuryanto, Ibnu Fathrio</i>	
Bab II Kajian Dampak Perubahan Iklim pada Sektor Pertanian: Upaya Strategis Adaptasi untuk Mendukung Ketahanan Pangan	15
<i>Woro Estiningtyas, Ai Dariah, Yayan Apriyana, Elsa Rakhmi Dewi</i>	
Bab III Pengaruh Kondisi Iklim terhadap Pertanian Padi dan Jagung di Nusa Tenggara Timur.....	59
<i>Bayu Dwi Apri Nugroho</i>	
Bab IV Sistem Prediksi Iklim atau Model Iklim? Pemodelan untuk Prediksi Iklim?	89
<i>Prawira Yudha Kombara, Amalia Nurlatifah, Aulia Arip Rakhman</i>	

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bab V	Perkembangan Metode Prediksi Iklim untuk Menunjang Ketahanan Pangan.....	119
	<i>Suciantini, Elza Surmaini, Yayan Apriyana, Erni Susanti, Misnawati, Yudi Riadi Fanggidae</i>	
Bab VI	Operasional Analisis dan Prediksi Musim di Indonesia.....	159
	<i>Robi Muharsyah, Supari, Dian Nur Ratri, Achmad Fachri Radjab, Ardhasena Sopaheluwakan, Amsari Mudzakir Setiawan, Adi Ripaldi, Fatchiyah, Damiana Fitria Kusatiti, Adyaksa Budi Raharja, Novi Fitrianti, Tiar Maharani, Niken Wahyuni, Arda Yuswantoro, Marlin Denata, Rosi Hanif Damayanti, Muhammad Agfi Isra Ramadhan, Alexanders Eggy, Fathiya Nurrahmanita, Indra Gustari, Syahru Romadhon, Diah Ariefiyanti, Mia Rosmiati, Suci Pratiwi, Ridha Rahmat, Hasalika Nurjanah, Alif Akbar Syafriano, Dyah Ayu Kartika, Yohanes Agung Kristomo</i>	
Bab VII	Digitalisasi untuk Prediksi Iklim dan Ketahanan Pangan Nasional.....	195
	<i>Septrial Arafat, Anita Dwy Fitria, Annisa Firdauzi, Dian Safitri, Leny Yuliyantri, Rahmila Dapa</i>	
Bab VIII	Kompleksitas Pemodelan Deret Waktu untuk Cuaca: Kasus Kelembapan Relatif dan Penyinaran Matahari	225
	<i>Januardi</i>	
Bab IX	Pemodelan Ekstrapolasi Profil Kelembapan dari Pengamatan GNSS-RO untuk Estimasi Total Kandungan Uap Air Atmosfer dalam Mendukung Sistem Prediksi Iklim untuk Ketahanan Pangan	263
	<i>Noersomadi</i>	
Bab X	EWS SIPANTARA: Implementasi Prediksi Iklim Menggunakan Kecerdasan Buatan.....	291
	<i>Muhammad Agung Sunus, Aris Pramudia, Adi Ripaldi, Darmawan Lahru Riatma, Erni Susanti, Suciantini, Yudi Riadi Fanggidae, Ferrari Pinem, Kharmila Sari Hariyanti, Rahmawati, Asmarhansyah, Yuliastuti Purwaningsih, Aneng Hermami, Antoni Setiawan, Muhamad Roy Setiawan Tambunan, Desy Rakhma Caesarani Utomo, Hendry Puguh Susetyo, Slamet Riyadi, Andi Abdurahim, Ella Winda Rahmatika, Aidil Azhar</i>	

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bab XI	Pertanian Cerdas Iklim Menuju <i>Zero Emission</i>	321
	<i>Tania June, Yeli Sarvina</i>	
Bab XII	Sistem Padi Aerobik: Transformasi Pertanian Indonesia Menuju Produktivitas Berkelanjutan.....	353
	<i>Bhaskara Anggarda Gathot Subrata, Andrianto Ansari, Taufan Alam</i>	
Bab XIII	Peran Sains dan Teknologi Atmosfer dalam Upaya Mewujudkan Ketahanan Pangan dan Pertanian Berkelan- jutan Menghadapi Perubahan Iklim	393
	<i>Ibnu Fathrio, Danang Eko Nuryanto</i>	
	Glosarium.....	407
	Daftar Singkatan.....	415
	Tentang Penulis	419
	Indeks	443

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Daftar Gambar

Gambar 2.1	Jumlah Bencana Periode 2014–2023.....	16
Gambar 2.2	Anomali Produksi Padi di Indonesia Periode 1990–2020	19
Gambar 2.3	Peta Kerentanan Usaha Tani Pangan serta Risiko Banjir dan Kekeringan Kabupaten di Pulau Jawa.....	20
Gambar 2.4	Proyeksi Rata-Rata Suhu Tahunan 2021–2050	22
Gambar 2.5	Rataan Curah Hujan Tahunan Periode 2021–2050	23
Gambar 2.6	Proyeksi Dampak Perubahan Iklim pada Subsektor Pangan	30
Gambar 2.7	Proyeksi Perubahan Produktivitas Padi Irrigasi MH (A) dan MK (B) Periode 2036–2050 untuk Skenario RCP 4.5 Menggunakan Model CSIROMK3.6...	31
Gambar 2.8	Dampak La Niña dan El Niño terhadap Perubahan Luas Panen Tanaman Padi, Jagung, Kedelai, dan Ubi Kayu Periode 1970–2010.....	33
Gambar 2.9	Dampak El Niño dan La Niña terhadap Produksi Tanaman Padi, Jagung, Kedelai, dan Ubi Kayu Periode 1970–2010	34
Gambar 2.10	Distribusi Sektor pada 192 Teknologi Adaptasi Prioritas yang Diidentifikasi dalam 25 Laporan TNA.....	43

Gambar 2.11	Manfaat Implementasi Teknologi Adaptasi di Sektor Pertanian	43
Gambar 2.12	Persentase Prioritas Teknologi Adaptasi yang Diperlukan di Sektor Pertanian	44
Gambar 2.13	Kerangka Pikir PBI dan PRK di Sektor Pertanian untuk Mendukung Ketahanan Pangan	46
Gambar 2.14	Peran Adaptasi dan PBI dalam Menekan Kerugian Ekonomi	47
Gambar 2.15	Sebaran Lokasi Prioritas Kegiatan Ketahanan Iklim Sektor Pertanian	48
Gambar 3.1	Luas Panen dan Produksi Tanaman Pangan Utama (Padi dan Jagung) di Indonesia (1993–2009)	62
Gambar 3.2	Hubungan Curah Hujan dan Produktivitas (Yres) Skala Provinsi	64
Gambar 3.3	Grafik Curah Hujan (mm/Bulan) Versus Waktu (Bulan)	67
Gambar 3.4	Kalender Tanam Padi dan Jagung di Kabupaten Kupang Tahun 2016–2017	76
Gambar 3.5	Kalender Tanam Padi dan Jagung di Kabupaten Kupang Tahun 2017–2018	76
Gambar 3.6	Kalender Tanam Padi dan Jagung di Kabupaten Kupang Tahun 2019–2020	76
Gambar 3.7	Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Januari 2016–April 2016	77
Gambar 3.8	Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Desember 2016–Maret 2017	78
Gambar 3.9	Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Desember 2017–Maret 2018	78
Gambar 3.10	Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Januari 2019–April 2019	78
Gambar 3.11	Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Desember 2019–Maret 2020	79
Gambar 3.12	Grafik neraca air tanaman jagung periode Desember 2016–Februari 2017	79
Gambar 3.13	Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Januari 2017–Maret 2017	79
Gambar 3.14	Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Desember 2017–Februari 2018	79

Gambar 3.15	Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Januari 2019–Maret 2019	80
Gambar 3.16	Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Januari 2020–Maret 2020	80
Gambar 4.1	Skema dari Sistem Iklim Global (Cetak Tebal), Proses dan Interaksinya (Panah Tipis), serta Beberapa Aspek yang Mungkin Berubah (Panah Tebal)	94
Gambar 4.2	Ilustrasi Proses yang Ditambahkan Ke Model Iklim Global	100
Gambar 4.3	Komponen Model Iklim CEMS	104
Gambar 4.4	Tampilan Depan Laman Climate Change Service	105
Gambar 4.5	Informasi Prediksi Indeks ENSO pada Laman BMKG	109
Gambar 5.1	Anomali Produksi Padi Nasional Periode 1990–2017 ..	126
Gambar 5.2	Ilustrasi Analisis Korelasi Kanonik.....	135
Gambar 5.3	Sebaran prediksi model numerik yang ditunjukkan oleh lingkaran elips, makin lebar apabila makin jauh dari kondisi awalnya	137
Gambar 5.4	Perbandingan Curah Hujan Musim Panas Berdasarkan Data Observasi dan Prediksi Model	140
Gambar 5.5	Contoh Informasi Prediksi Iklim yang Dikeluarkan oleh BMKG	141
Gambar 5.6	Alur Pengembangan dan Diseminasi Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu	144
Gambar 5.7	Contoh Kalender Tanam Padi Sawah Musim Hujan (MH) di Kabupaten Klaten.....	145
Gambar 5.8	Contoh Informasi Prediksi Risiko Kekeringan Tanaman Padi di Jawa Barat.....	146
Gambar 6.1	Sebaran ZOM dengan Tipe Satu Musim (Hijau), Dua Musim (Kuning), dan Empat Musim (Merah).....	163
Gambar 6.2	Ilustrasi Pola Klimatologi Hujan Dasarian yang Menunjukkan Perbedaan Tipe Musim	164
Gambar 6.3	Tahapan Penyiapan Konsep, Tahapan Pembahasan Prediksi Musim, hingga Tahapan Penyebaran Informasi Prediksi Musim ke Publik dan Pengguna	170
Gambar 6.4	Ilustrasi Tahapan Penyiapan Rancangan Prediksi Musim hingga Tahap Pembahasan dalam Forum Internal BMKG pada Tingkat Nasional.....	176
Gambar 6.5	Produk Informasi Prakiraan Musim Kemarau 2023	181

Gambar 6.6	Pemantauan Perkembangan Musim Kemarau 2023 pada 699 ZOM di Indonesia	185
Gambar 7.1	Kerangka Konsep Ketahanan Pangan	200
Gambar 7.2	Peta Indeks Ketahanan Pangan Provinsi 2022	201
Gambar 7.3	Produktivitas Tanaman Padi Menurut Komoditas pada Dua Musim Tahun 2017	202
Gambar 7.4	Permodelan NDDI menggunakan Landsat 8	208
Gambar 7.5	Tahapan untuk Menjalankan Permodelan dengan CROPWAT 8.0	217
Gambar 7.6	Tampilan Jadwal Irrigasi pada Aplikasi CROPWAT 8.0.....	218
Gambar 8.1	Kesalahan Estimasi Prediksi pada Kelembapan (A) dan Durasi Penyinaran (B)	229
Gambar 8.2	Diagram Alir dari Pengolahan Data Cuaca yang Disertai Transformasi Data	233
Gambar 8.3	Perbedaan Penggunaan Tanpa (A) dan dengan (B) Transformasi <i>Log-odds</i>	235
Gambar 8.4	Data Kelembapan dan Durasi Penyinaran Kota Bandung dari Tahun 2000–2022.....	239
Gambar 8.5	Transformasi <i>Log-odds</i> dari Data Kelembapan dan Durasi Penyinaran Kota Bandung dari Tahun 2000–2022	240
Gambar 8.6	Analisis Tren dari <i>Log-odds</i> Kelembapan dan Durasi Penyinaran Kota Bandung dari Tahun 2000–2022.....	240
Gambar 8.7	Analisis Musiman (<i>Seasonality</i>) dari <i>Log-odds</i> Kelembapan dan Durasi Penyinaran Kota Bandung dari Tahun 2000–2022	241
Gambar 8.8	Analisis Data Latihan Kelembapan dari Kota Bandung Tahun 2000–2021	244
Gambar 8.9	Analisis Data Latihan Durasi Penyinaran dari Kota Bandung Tahun 2000–2021	244
Gambar 8.10	Analisis Data Validasi Kelembapan dari Kota Bandung Tahun 2022.....	245
Gambar 8.11	Analisis Data Validasi Durasi Penyinaran dari Kota Bandung Tahun 2022.....	246
Gambar 8.12	<i>Boxplot</i> dari Kelembapan Kota Bandung Tahun 2000–2022	249

Gambar 8.13	<i>Boxplot</i> dari Durasi Penyinaran Kota Bandung Tahun 2000–2022	249
Gambar 8.14	Prediksi Kelembapan Kota Bandung Tahun 2472–2480	251
Gambar 8.15	Prediksi Durasi Penyinaran Kota Bandung Tahun 2064–2068	252
Gambar 9.1	Rerata Tahunan Presipitasi Global Hasil Pengamatan Satelit Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM).....	266
Gambar 9.2	Empat Konstelasi GNSS	268
Gambar 9.3	Skema Geometri pada RO	271
Gambar 9.4	Dasar Fisis GNSS-RO Berdasarkan Hukum Snellius....	272
Gambar 9.5	Jumlah total okultasi global (atas) dan dalam cakupan wilayah Benua Maritim Indonesia (bawah) dari pengamatan satelit COSMIC-2.....	275
Gambar 9.6	Lokasi Kejadian Okultasi (Lingkaran Ungu) dan Titik Peluncuran Radiosonde (Kotak Kuning).....	276
Gambar 9.7	Diagram Batang Distribusi Capaian Penetrasi Kejadian Okultasi di pada Tiap Interval Ketinggian di Atas Permukaan Bumi (Atas).....	277
Gambar 9.8	Distribusi Frekuensi Koefisien A, B, dan C untuk Model Ekstrapolasi Linier Kuadratik.....	278
Gambar 9.9	Rerata (Garis dan Lingkaran Biru) dan Standar Deviasi (Garis Horizontal Abu-abu) Data Obervasi Profil q	279
Gambar 9.10	Profil COSMIC-2 pada Tanggal 13 Desember 2020 dan Model (Atas).....	280
Gambar 9.11	Deret waktu IWV radiosonde, IWV COSMIC-2 > 2km dan total IWV COSMIC-2ext.	282
Gambar 10.1	Diagram Alir Peringatan Dini Luas Serangan Hama Penyakit Tanaman	302
Gambar 10.2	Hubungan Antara Curah Hujan dengan Luas Tambah Tanam Bawang Merah di Kabupaten Brebes (a) dan Kabupaten Garut (b)	304
Gambar 10.3	Kondisi Pola Curah Hujan, Perkembangan Luas Tambah Tanam, dan Pola Tanam Bawang Merah di Kabupaten Brebes (a) dan Kabupaten Garut (b)	305
Gambar 10.4	Tahapan Riset dan Pengembangan EWS SIPANTARA	308

Gambar 10.5	Hasil Desain Maket Menggunakan <i>Tools Figma</i>	310
Gambar 10.6	<i>Geographical/Geospatial Artificial Intelligence</i> (GeoAI)	312
Gambar 10.7	Penyajian Informasi Hasil Terapan Kecerdasan Buatan dalam EWS SIPANTARA	313
Gambar 10.8	Halaman Depan Situs Web EWS SIPANTARA	315
Gambar 10.9	Fitur Penyajian Informasi Potensi Jadwal Tanam Bawang Merah	315
Gambar 10.10	Fitur Penyajian Informasi Spasial Serangan OPT	316
Gambar 10.11	Beberapa Fitur Tambahan pada EWS SIPANTARA	317
Gambar 11.1	Tiga Pilar CSA	323
Gambar 11.2	Teknologi dan Potensi Rata-Rata Pengurangan Emisi	340
Gambar 11.3	Sistem Tumpang Sari Kopi dan Pisang di Lampung Barat	346
Gambar 11.4	Indikator CSA pada Setiap Pilar CSA	347
Gambar 12.1	Sistem Padi Aerobik Menggunakan Irigasi Tetes	360
Gambar 12.2	Proses Pembentukan Emisi Gas Metana	364
Gambar 12.3	Konsep Jaringan Irigasi Tetes Gravitasi Hemat Energi.....	378

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Daftar Tabel

Tabel 2.1	Proyeksi Suhu Udara 2026–2050 di Indonesia	22
Tabel 2.2	Proyeksi Curah Hujan 2026–2050 di Indonesia	24
Tabel 2.3	Proyeksi Dampak Perubahan Iklim pada Padi, Jagung, dan Kedelai	30
Tabel 2.4	Dampak Positif Perubahan Iklim terhadap Sektor Pertanian	36
Tabel 2.5	Dampak Positif Tindakan Adaptasi pada Kondisi Iklim Ekstrem Mendukung Ketahanan Pangan	39
Tabel 3.1	Nilai Korelasi Iklim Global dan Curah Hujan.....	64
Tabel 3.2	Nilai Korelasi Curah Hujan dan Produktivitas.....	65
Tabel 3.3	Nilai Indeks Kekeringan (SPI) Regional 2 (2008–2015)	69
Tabel 3.4	Data Klasifikasi Sifat Hujan Provinsi NTT (2008–2015)	71
Tabel 3.5	Curah Hujan Rerata Bulanan Periode Tahun 2008–2015 Stasiun Curah Hujan David Constantijn Saudale	72
Tabel 3.6	Hubungan Sistem Bercocok Tanam di Tiap Zona.....	72
Tabel 3.7	Neraca Air Padi di Kabupaten Kupang.....	75
Tabel 3.8	Neraca Air Jagung di Kabupaten Kupang.....	75
Tabel 3.9	Nilai Koefisien Tanaman Padi dan Jagung Berdasarkan Umur Tanaman.....	77

Tabel 3.10 Nilai Kebutuhan Air Padi pada Masa Tanam Bulan Desember	80
Tabel 3.11 Nilai Kebutuhan Air Padi pada Masa Tanam Bulan Januari	81
Tabel 3.12 Nilai Kebutuhan Air Padi pada Masa Tanam Bulan Desember	81
Tabel 3.13 Nilai Kebutuhan Air Padi pada Masa Tanam Bulan Januari	81
Tabel 6.1 Jumlah Subtipe ZOM pada Tiap Pulau Besar	166
Tabel 6.2 Model yang Digunakan dalam Pengambilan Keputusan untuk Prediksi Musim.....	180
Tabel 6.3 Contoh Sebaran Jumlah ZOM pada Tiap Pulau Besar yang dimutakhirkan untuk PMK 2023	188
Tabel 7.1 Kondisi Tanah di NTT	214
Tabel 7.2 Kondisi Tanah di NTT	215
Tabel 7.3 Hasil Evaluasi Lahan di NTT	215
Tabel 8.1 Statistika Deskriptif Data Kelembapan dan Durasi Penyinaran Kota Bandung dari Tahun 2000–2022	239
Tabel 8.2 Estimasi Statistik dari Model TSLM Kelembapan.....	242
Tabel 8.3 Estimasi Statistik dari Model TSLM Durasi Penyinaran	243
Tabel 8.4 Akurasi Model Kelembapan	247
Tabel 8.5 Akurasi Model Durasi Penyinaran	247
Tabel 10.1 Nilai Koefisien Korelasi antara Luas Tanam dan Luas Panen Bawang Merah untuk Bulan yang Sama, Jeda -1, -2, dan -3 Bulan	307
Tabel 12.1 Total Kumulatif Emisi Gas Metana (CH_4) Budi Daya Padi Sistem Tradisional dan Aerobik	363
Tabel 12.2 Kemampuan Sistem Padi Aerobik Beradaptasi di Zona Agroekologi Indonesia.....	367
Tabel 12.3 Efisiensi Penggunaan Air, Produktivitas Air, dan Hasil Panen Padi di Bawah Pengelolaan Air yang Berbeda	371

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.

Ketahanan pangan kini menjadi isu yang makin mendesak seiring tantangan global yang dipicu oleh perubahan iklim. Negara-negara di seluruh dunia, termasuk Indonesia, dihadapkan pada risiko serius terkait produksi pangan, terutama karena ketergantungan mereka pada sektor pertanian. Perubahan kondisi lingkungan akibat perubahan iklim serta fenomena cuaca ekstrem dapat menyebabkan fluktuasi hasil pertanian. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu dapat memperpendek masa pertumbuhan tanaman, mengurangi produksi panen, dan berdampak pada kualitas tanah.

Buku *Prediksi Iklim untuk Ketahanan Pangan* hadir untuk membuka, menginformasikan, dan memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang dampak perubahan iklim dan dampaknya bagi sektor pangan. Buku ini berisi esai-esai yang mengeksplorasi isu-isu terkait, termasuk bagaimana sistem prediksi iklim berkembang seiring dengan kemajuan teknologi komputasi. Buku ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber referensi bagi peneliti atau akademisi serta masyarakat luas untuk pembelajaran terkait iklim dan ketahanan pangan.

Kami berharap hadirnya buku ini dapat menjadi referensi bacaan untuk menambah wawasan dan pengetahuan bagi seluruh pembaca. Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Prakata

Perubahan iklim menjadi isu global yang mendatangkan berbagai dampak khususnya pada sektor pertanian. Dampak perubahan iklim berupa kekeringan, banjir, dan cuaca ekstrem dapat merusak tanaman pangan sehingga menjadi ancaman keberlangsungan ketersediaan pangan yang menyangkut hajat hidup orang banyak. Perubahan iklim selain mendatangkan kerusakan dan korban jiwa juga berdampak pada sektor pertanian, seperti berkurangnya pendapatan petani serta meningkatnya biaya untuk bercocok tanam. Hal ini disebabkan karena perubahan iklim membuat perubahan cuaca dan musim sehingga waktu tanam menjadi lebih pendek dan tidak menentu, hama dan penyakit tanaman meningkat, serta pola cuaca dan musim yang tidak lagi ideal menyebabkan kondisi tanah yang buruk untuk bercocok tanam. Dampak lainnya, yaitu menurunnya pasokan makanan bergizi untuk masyarakat dan pada akhirnya dapat meningkatkan kemiskinan.

Saat ini, pengetahuan dan teknologi makin berkembang, khususnya dalam bidang sains atmosfer dan iklim. Sebagai contoh, makin

canggihnya teknologi pengindraan jauh—khususnya satelit—yang dapat digunakan dalam mengamati kondisi cuaca dan iklim di bumi secara terus-menerus dan kemajuan perangkat keras dan lunak komputasi yang dapat digunakan untuk menjalankan model prediksi cuaca dan iklim yang lebih akurat dengan melibatkan perhitungan yang lebih kompleks. Para ilmuwan telah memanfaatkan hal tersebut dan menuangkannya dalam bentuk strategi adaptasi dan mitigasi perubahan iklim.

Buku ini mencakup artikel terkait upaya penerapan sains dan teknologi atmosfer dalam memprediksi dampak perubahan iklim dan membangun strategi adaptasi dan mitigasi yang diperlukan, seperti pemanfaatan informasi parameter iklim untuk menentukan kalender tanam, penerapan *climate-smart agriculture*, dan digitalisasi prediksi iklim. Buku ini juga mengenalkan kemajuan teknologi yang telah digunakan dan terus dikembangkan dalam pengamatan dan memprediksi cuaca dan iklim contohnya pemanfaatan satelit navigasi untuk pemantauan iklim dan kemajuan pemodelan iklim. Buku ini ditujukan kepada para pemangku jabatan di pusat dan daerah, periset, akademisi, serta praktisi, khususnya yang bergelut dalam upaya mewujudkan ketahanan pangan dan sebagai sarana untuk mengenalkan, mendidik, dan mencerdaskan masyarakat.

Bandung, 18 Oktober 2024

Editor

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bab I

Sistem Prediksi Iklim dalam Rangkaian Kebutuhan untuk Penguatan Ketahanan Pangan

Danang Eko Nuryanto, Ibnu Fathrio

A. Prediksi Iklim: Sebuah Kebutuhan

Di tengah tantangan global yang dihadapi akibat perubahan iklim, ketahanan pangan menjadi isu yang makin mendesak. Negara-negara di seluruh dunia, termasuk Indonesia, menghadapi risiko serius terkait produksi pangan, terutama dalam konteks ketergantungan pada sektor pertanian (Porter & Semenov, 2005). Sektor ini tidak hanya berfungsi sebagai penyedia makanan, tetapi juga sebagai sumber mata pencarian bagi jutaan orang.

Perubahan iklim yang terjadi saat ini tidak dapat dipandang remeh. Persoalan ini telah menimbulkan kekhawatiran terhadap kemampuan sistem pertanian untuk dapat beradaptasi terhadap perubahan iklim yang terjadi, yang berpotensi menurunkan produksi tanaman pangan

D. E. Nuryanto & I. Fathrio*

Badan Riset dan Inovasi Nasional, e-mail: ibnufathrio@gmail.com

© 2024 Editor & Penulis

Nuryanto, D. E. (2024). Sistem prediksi iklim dalam rangkaian kebutuhan untuk penguatan ketahanan pangan. Dalam D. E. Nuryanto & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (1–13). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1244.c1385. E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

(Wing et al., 2021). Hal ini karena produksi tanaman pangan rentan terhadap variabilitas iklim. Peningkatan suhu, peningkatan CO₂, dan perubahan pola curah hujan yang terkait dengan perubahan iklim dapat menyebabkan penurunan produksi tanaman pangan yang cukup besar (Eftekhari, 2022). Perubahan suhu, kelembapan, siklus basah-kering, serta beku-cair, dan sebagainya dapat menyebabkan perubahan dalam pertumbuhan dan fisiologi mikroorganisme tanah (Alkorta et al., 2017). Perubahan parameter lingkungan yang disebabkan oleh iklim memang dapat memengaruhi struktur dan fungsi komunitas mikroba tanah dan memodifikasi. Misalnya, tingkat interaksi di antara mikroorganisme yang diperlukan untuk degradasi polutan organik di tanah, stok karbon organik tanah, sifat tanah, seperti pH, kapasitas tukar kation (CEC), kapasitas menahan air (WEC), dan stok nutrisi (Garbisu et al., 2020; Baldrian et al., 2023; Hung et al., 2022). Peristiwa cuaca ekstrem, seperti kekeringan, gelombang panas ekstrem, dan curah hujan lebat yang menyebabkan banjir, telah meningkat dalam beberapa dekade terakhir, meningkatkan pencucian, erosi tanah, dan limpasan pada tingkat yang mengkhawatirkan.

Data dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) menunjukkan bahwa perubahan pola cuaca dapat mengakibatkan fluktuasi hasil pertanian. Hal ini sangat berpengaruh pada komoditas utama, seperti padi, jagung, dan kedelai, yang merupakan pangan pokok bagi masyarakat Indonesia. Dampak perubahan iklim ini tidak hanya terbatas pada aspek produksi, tetapi juga pada ketahanan sosial ekonomi masyarakat yang bergantung pada pertanian. Oleh karena itu, pemahaman yang lebih mendalam tentang dampak perubahan iklim ini sangat penting sebagai landasan untuk merumuskan strategi adaptasi yang efektif dan dapat lebih memahami seberapa besar risiko yang dihadapi oleh petani dan masyarakat yang bergantung pada sektor pertanian.

Penelitian menunjukkan bahwa suhu yang meningkat dapat memperpendek siklus pertumbuhan tanaman, mengurangi hasil panen, dan merusak kualitas tanah. Hal ini menjadi tantangan besar bagi petani yang bergantung pada pola cuaca yang telah mapan

selama bertahun-tahun. Beberapa riset menunjukkan bahwa secara historis, petani masih menghadapi kesulitan dalam beradaptasi dan merespons perubahan suhu dan curah hujan (Blanc & Reilly, 2017) sehingga perlu upaya-upaya yang lebih kuat untuk menghadapi perubahan iklim. Dalam hal ini, peranan prediksi iklim menjadi sangat vital untuk membantu para petani, peneliti, dan pembuat kebijakan dalam merumuskan langkah-langkah strategis yang diperlukan untuk memastikan ketahanan pangan pada masa depan. Dalam konteks ini, prediksi iklim menjadi sangat penting untuk membantu petani dan pemangku kepentingan merencanakan strategi yang tepat dalam menghadapi kondisi yang tidak menentu (Charalampopoulos & Droulia, 2024). Peranan prediksi iklim juga menjadi kunci untuk merencanakan dan mengelola sumber daya pertanian dengan lebih efektif. Dengan informasi yang akurat mengenai kondisi iklim pada masa yang akan datang, para petani dapat mengambil keputusan yang lebih baik mengenai waktu tanam, jenis tanaman yang akan ditanam, serta teknik pengelolaan yang diperlukan untuk meminimalkan risiko.

Berbagai pihak terkait—terutama pemerintah—melakukan berbagai pendekatan adaptasi untuk meningkatkan produktivitas dan untuk menjaga keberlanjutan lingkungan. Adaptasi bukan hanya sekadar respons terhadap perubahan yang terjadi, melainkan juga merupakan langkah proaktif untuk mengurangi kerentanan terhadap dampak perubahan iklim. Misalnya, penggunaan sistem irigasi yang efisien dan pengelolaan sumber daya air yang baik dapat membantu petani menghadapi kekeringan. Selain itu, pelatihan dan pendidikan bagi petani mengenai praktik pertanian yang berkelanjutan sangat diperlukan untuk meningkatkan ketahanan pangan. Adaptasi dalam konteks pertanian pada umumnya mencakup sejumlah strategi, mulai dari pengembangan varietas tanaman yang tahan terhadap kondisi ekstrem, hingga penerapan praktik pertanian berkelanjutan. Pengetahuan tentang teknik pengelolaan air, pemupukan yang efisien, dan rotasi tanaman akan menjadi bagian penting dari diskusi ini. Dengan pendekatan adaptasi yang tepat, kita dapat meningkatkan ketahanan pangan dan menjaga keberlanjutan lingkungan. Hal lain yang penting

untuk dipertimbangkan juga adalah bahwa setiap daerah bersifat unik sehingga riset-riset di berbagai daerah mutlak diperlukan agar strategi dan program-program yang diterapkan menjadi efektif dan efisien.

B. Beberapa Persoalan dalam Prediksi Iklim

Prediksi iklim telah berkembang mulai lebih dari satu abad yang lalu, diawali oleh Joseph Fourier tahun 1824 yang menjelaskan efek rumah kaca, dilanjutkan oleh John Tyndall pada tahun 1859 yang berhasil mengidentifikasi gas-gas tertentu, seperti uap air dan karbon dioksida sebagai gas rumah kaca utama. Tahun 1896 Svante Arrhenius mengungkapkan bagaimana menghitung dampak peningkatan karbon dioksida pada suhu Bumi dan memperkirakan bahwa penggandaan kadar CO₂ dapat menghangatkan planet ini secara signifikan. Perhitungan-perhitungan efek rumah kaca tersebut terus berkembang dan menjadi salah satu dasar dalam perhitungan model-model atmosfer dan prediksi iklim.

Prediksi cuaca numerik mulai berkembang pada 1950-an, yang meletakkan dasar-dasar pemodelan iklim modern. *General circulation models* (GCM) berhasil menyimulasikan sistem iklim Bumi dan telah menjadi makin canggih, menggabungkan interaksi antara atmosfer, lautan, daratan, dan lapisan es. Berbagai kemajuan dan kebutuhan dalam pemodelan dan prediksi iklim, mendorong berbagai negara untuk membentuk Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC dibentuk oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) pada tahun 1988 yang bertujuan untuk mengevaluasi ilmu pengetahuan terkait perubahan iklim yang disebabkan oleh aktivitas manusia.

Pada dekade terakhir, sistem komputasi yang ada telah memungkinkan simulasi iklim yang lebih terperinci dan akurat. Bersama dengan perkembangan sistem pengamatan dengan satelit dan kecerdasan buatan, sistem prediksi iklim terus mengalami peningkatan resolusi dan akurasi.

Dengan pesatnya perkembangan teknologi komputasi dan pengindraan jauh, tidak berarti bahwa pengembangan sistem prediksi

iklim berjalan tanpa masalah. Prediksi iklim merupakan bidang yang kompleks dengan beberapa tantangan. Berikut ini adalah beberapa masalah utama yang dihadapi berbagai negara untuk memperoleh akurasi yang lebih baik.

- 1) Pemahaman yang tidak lengkap tentang sistem bumi. Pengetahuan kita tentang interaksi antara atmosfer, lautan, daratan, dan es masih terus berkembang melalui berbagai riset. Pemahaman mengenai sistem interaksi ini sangat penting untuk memperoleh hasil prediksi iklim yang akurat.
- 2) Variabilitas alami. Sistem iklim memiliki variabilitas yang inheren pada skala waktu yang berbeda (misalnya, musiman, antartahunan, dan dekade). Variabilitas ini dapat mengaburkan tren jangka panjang dan membuat prediksi menjadi lebih sulit.
- 3) Keterbatasan model. Model iklim merupakan alat yang penting, tetapi memiliki keterbatasan. Model bergantung pada perkiraan dan asumsi yang dapat menimbulkan kesalahan. Selain itu, model yang berbeda dapat menghasilkan hasil yang berbeda untuk skenario yang sama.
- 4) Kualitas dan ketersediaan data. Untuk menghasilkan prediksi iklim yang akurat memerlukan data observasional berkualitas tinggi. Namun, terdapat kesenjangan dalam cakupan data, terutama di daerah terpencil. Kesalahan pengukuran dan bias dalam instrumen observasional juga menimbulkan tantangan.
- 5) Keterbatasan prediktabilitas. Terdapat batasan teoretis sejauh mana kita dapat memprediksi iklim secara akurat pada masa mendatang. Kesalahan kecil pada kondisi awal dapat bertambah seiring waktu, yang menyebabkan ketidakpastian signifikan dalam prediksi jangka panjang.
- 6) Pengaruh manusia. Memprediksi iklim masa depan juga melibatkan estimasi aktivitas manusia pada masa depan, seperti emisi gas rumah kaca, perubahan penggunaan lahan, dan kemajuan teknologi. Faktor-faktor ini sangat tidak pasti dan dapat berdampak signifikan pada hasil prediksi iklim.

Meskipun terdapat berbagai tantangan ini, kemajuan dalam ilmu pengetahuan dan teknologi iklim terus meningkatkan kemampuan kita untuk memprediksi dan memahami perubahan iklim. Selain itu, sebuah prediksi iklim tidak akan menjadi sebuah alat yang berharga apabila tidak diiringi oleh langkah-langkah bagaimana menyikapinya. Pengembangan langkah-langkah strategi adaptasi dan mitigasi merupakan langkah nyata untuk menyikapi apa yang dihasilkan dari sistem prediksi yang telah dilakukan dan memberikan kebermanfaatan terhadap berbagai sektor.

C. Mencari Jalan Menuju Ketahanan Pangan

Peningkatan ketahanan pangan bukan merupakan persoalan yang sederhana, tetapi menjadi tantangan kompleks dan memerlukan keberlanjutan. Ketahanan pangan tidak dapat dicapai hanya oleh tingginya tingkat produktivitas pertanian, tetapi harus ditunjang oleh praktik-praktik yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, kemampuan untuk beradaptasi terhadap perubahan iklim, dukungan sistem rantai pasokan yang optimal, dukungan kebijakan dan sistem tata kelola, riset dan inovasi, serta upaya-upaya lainnya yang melibatkan berbagai pihak. Peningkatan produktivitas pertanian mutlak diperlukan untuk memenuhi permintaan pangan yang terus meningkat. Upaya ini termasuk mengadopsi teknik pertanian modern, meningkatkan varietas tanaman, dan memanfaatkan teknologi pertanian presisi. Praktik berkelanjutan diperlukan untuk meminimalkan dampak buruk praktik-praktik pertanian terhadap lingkungan, seperti penghematan air, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan menjaga keseimbangan nutrisi tanah. Beradaptasi dengan perubahan iklim pun menjadi strategi yang tidak dapat diabaikan karena perubahan iklim menimbulkan ancaman signifikan terhadap ketahanan pangan dengan memengaruhi hasil panen, ketersediaan air, dan frekuensi kejadian cuaca ekstrem. Dalam hal ini, mengembangkan tanaman dan praktik pertanian yang tahan iklim menjadi opsi yang sangat penting. Semua hal tersebut, tidak lepas dari proses riset dan inovasi dalam mengembangkan teknologi dan praktik baru yang dapat

meningkatkan ketahanan pangan. Hal ini termasuk bioteknologi, pertanian digital, metode pertanian berkelanjutan, dan riset-riset yang mendukung peningkatan pemahaman terhadap interaksi alam dan sistem prediksi yang lebih baik.

Sistem prediksi iklim yang diperlukan untuk menunjang sistem pertanian dan ketahanan pangan nasional adalah sistem prediksi yang andal dengan akurasi dan resolusi yang sesuai tingkatan pengambilan keputusan. Kebijakan-kebijakan yang bersifat lokal tentunya akan membutuhkan data prediksi yang lebih resolusi waktu dan resolusi spasial yang tinggi. Dengan demikian, persoalan-persoalan yang menentukan keakuratan dan resolusi perlu terus diurai dan dipecahkan bersama oleh berbagai pemangku kepentingan.

Buku ini menyajikan berbagai perspektif tentang peranan prediksi iklim dalam mendukung ketahanan pangan. Melalui analisis mendalam mengenai dampak perubahan iklim, upaya adaptasi yang diperlukan, serta teknologi yang dapat digunakan, naskah ini akan membahas tantangan yang dihadapi serta solusi yang dapat diimplementasikan.

Bab II dari buku ini membahas secara mendalam mengenai dampak perubahan iklim pada sektor pertanian. Penulis menunjukkan bahwa perubahan suhu dan pola curah hujan yang tidak menentu dapat mengganggu pertumbuhan tanaman yang pada gilirannya berpengaruh terhadap hasil panen. Fenomena cuaca ekstrem, seperti banjir, kekeringan, dan serangan hama, makin sering terjadi dan menyebabkan kerugian besar bagi petani. Selain itu, penulis juga menguraikan berbagai pendekatan adaptasi untuk meningkatkan produktivitas dan untuk menjaga keberlanjutan lingkungan. Adaptasi bukan hanya sekadar respons terhadap perubahan yang terjadi, melainkan juga merupakan langkah proaktif untuk mengurangi kerentanan terhadap dampak perubahan iklim. Misalnya, penggunaan sistem irigasi yang efisien dan pengelolaan sumber daya air yang baik dapat membantu petani menghadapi kekeringan. Selain itu, pelatihan dan pendidikan bagi petani mengenai praktik pertanian yang berkelanjutan sangat diperlukan untuk meningkatkan ketahanan pangan.

Bab III memberikan pembahasan yang spesifik mengenai pengaruh kondisi iklim terhadap pertanian padi dan jagung di Nusa Tenggara Timur (NTT). Nusa Tenggara Timur (NTT), sebuah provinsi di Indonesia yang dikenal dengan keindahan alam dan keragaman budayanya, juga menghadapi tantangan serius terkait pola curah hujan dan indeks kekeringan. Penulis mengkaji pola curah hujan dan analisis indeks kekeringan di NTT, serta klasifikasi iklimnya, untuk memahami interaksi antara iklim dan pertanian. Dengan mempelajari fenomena ini, diharapkan dapat ditemukan solusi adaptasi yang efektif bagi masyarakat agraris di NTT sehingga mereka dapat mempertahankan dan meningkatkan produktivitas pertanian dalam menghadapi tantangan perubahan iklim.

Bab IV membahas seputar pemodelan untuk prediksi iklim. Dalam era perubahan iklim yang makin nyata, pemahaman terhadap model iklim menjadi makin penting. Model iklim, yang awalnya merupakan pengembangan dari prediksi cuaca, memiliki sejarah panjang yang dimulai pada tahun 1940-an. Vilhelm Bjerknes, seorang ilmuwan meteorologi, menjadi pelopor dalam pendekatan matematis untuk memprediksi cuaca, menekankan perlunya memahami sirkulasi atmosfer melalui persamaan fisika. Sejak saat itu, berbagai inovasi dan kolaborasi ilmiah telah membentuk perkembangan model iklim, dari penggunaan komputer pertama untuk simulasi sirkulasi global hingga teori *chaos* yang menambah kompleksitas prediksi atmosfer. Melalui bab ini, penulis memberikan hasil penelusurannya mengenai evolusi model iklim, dari pencapaian awal hingga inovasi terkini, serta bagaimana berbagai lembaga penelitian di seluruh dunia berkontribusi dalam menciptakan pemahaman yang lebih baik tentang iklim kita. Dalam konteks ini, akan dibahas berbagai jenis model yang digunakan oleh ilmuwan untuk menganalisis dan memprediksi pola cuaca, serta bagaimana hasil model ini dapat diterapkan dalam perencanaan pertanian. Selain itu, penting untuk memahami bahwa model iklim harus terus diperbarui dan disesuaikan dengan data terbaru untuk memastikan akurasi prediksi.

Bab V membahas lebih jauh bagaimana perkembangan metode prediksi iklim yang mengarah pada perbaikan akurasi data hasil prediksi. Penulis mengulas inovasi terbaru dalam teknik dan alat prediksi yang dapat mendukung sistem pengambilan keputusan untuk meningkatkan ketahanan pangan. Teknologi ini diharapkan tidak hanya dapat meningkatkan akurasi prediksi, tetapi juga membantu dalam analisis data yang lebih kompleks. Dengan penerapan metode terbaru ini, sektor pertanian dapat beradaptasi dengan lebih cepat dan efisien terhadap perubahan iklim yang terjadi. Penggunaan teknologi, seperti kecerdasan buatan dan analisis *big data*, memungkinkan kita untuk mendapatkan informasi yang lebih akurat dan *real-time* mengenai kondisi iklim. Dengan menggunakan berbagai metode, dari yang berbasis statistik hingga model dinamik yang canggih, teknologi ini menyediakan data tentang anomali iklim dan curah hujan yang esensial untuk perencanaan pertanian. Di tengah ketidakpastian yang disebabkan oleh perubahan iklim dan fenomena global, seperti ENSO, pendekatan prediksi yang terintegrasi dan berbasis data menawarkan harapan untuk meningkatkan ketahanan pangan dan keberlanjutan pertanian.

Bab VI memuat uraian bagaimana operasional analisis dan prediksi musim di Indonesia. Sistem analisis dan prediksi musim yang operasional menjadi hal yang krusial. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) berperan penting dalam merumuskan prediksi musim yang akurat untuk membantu masyarakat dan pemerintah dalam merencanakan aktivitas pembangunan. Melalui serangkaian tahapan yang terstruktur, mulai dari penyiapan rancangan hingga pemutakhiran informasi, BMKG tidak hanya memberikan data kuantitatif, tetapi juga mempertimbangkan berbagai faktor ilmiah dan sosial. Bab ini juga mengupas tahapan-tahapan dalam pembuatan prediksi musim di BMKG, menjelaskan metode yang digunakan, dan menggambarkan bagaimana informasi ini disebarluaskan untuk memberikan manfaat maksimal kepada masyarakat, serta pihak-pihak mana saja yang terlibat dalam pengolahan, analisis, dan validasi datanya.

Bab VII membahas digitalisasi untuk prediksi iklim. Di tengah tantangan perubahan iklim yang makin mendesak, digitalisasi muncul sebagai alat penting untuk mengatasi dampak lingkungan dan memastikan keberlanjutan. Data iklim, yang mencatat pola atmosfer, lautan, dan lingkungan selama bertahun-tahun, menjadi dasar bagi analisis dan perencanaan yang lebih baik. Dengan teknologi mutakhir, seperti sensor, *internet of things* (IoT), dan kecerdasan buatan, kita dapat mengumpulkan dan menganalisis data dengan lebih efisien sehingga memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat. Dalam bab ini juga dibahas bagaimana digitalisasi dapat memfasilitasi mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim melalui pengelolaan data yang lebih baik, serta aplikasinya dalam prediksi iklim dan manajemen pertanian. Dengan pendekatan kolaboratif yang didukung oleh data yang kuat, kita dapat meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim dan mewujudkan masa depan yang lebih berkelanjutan.

Bab VIII menunjukkan salah satu kompleksitas pemodelan deret waktu untuk cuaca. Pemodelan deret waktu untuk cuaca merupakan metode kompleks yang digunakan untuk menganalisis data cuaca historis. Dalam bab ini, penulis mengupas bagaimana pemodelan ini dapat memberikan wawasan tentang kelembapan relatif dan penyinaran matahari. Memahami kompleksitas ini adalah langkah penting untuk mengembangkan model prediksi yang lebih akurat dan dapat diandalkan. Dengan mengangkat kasus di Kota Bandung, bab ini juga menyoroti pentingnya mencermati beberapa kesalahan hasil prediksi mengenai kelembapan dan durasi penyinaran dalam pertanian. Hal ini penting untuk menjaga konsistensi logis nilai parameter iklim. Dalam bab ini, disampaikan salah satu teknik bagaimana menjaga konsistensi logis tersebut.

Bab IX menyajikan pemodelan ekstrapolasi profil kelembapan dari pengamatan GNSS-RO. Teknologi GNSS dan pengamatan *radio occultation* (RO) memberikan kesempatan baru dalam memodelkan kelembapan atmosfer. Dalam bab ini, kita akan membahas bagaimana teknik ini digunakan untuk memperkirakan total kandungan uap air

di atmosfer dan bagaimana data ini dapat digunakan untuk meningkatkan sistem prediksi iklim. Pada bab ini juga diberikan penjelasan tentang keterbatasan balon radiosonde dan keuntungan dari pengamatan menggunakan GNSS-RO, seperti resolusi yang lebih tinggi, memberikan konteks yang kuat bagi pembaca mengenai pentingnya inovasi ini. Data yang diperoleh dari GNSS-RO, yang mencapai ketinggian hingga 50 km dengan resolusi tinggi, menegaskan keunggulan teknologi ini. Bab ini juga memberikan informasi mengenai pengaruh signifikan dari data RO terhadap sistem *numerical weather prediction* (NWP) di berbagai lembaga meteorologi. Ini menunjukkan validitas dan aplikasi praktis dari teknologi ini dalam meningkatkan akurasi prediksi cuaca, yang penting untuk berbagai sektor, termasuk pertanian.

Bab X memuat bahasan mengenai Early Warning System (EWS) Perlindungan Hortikultura dan Pengelolaan Tanam Komoditas Strategis (SIPANTARA). EWS ini merupakan aplikasi yang dibangun oleh Direktorat Jenderal Hortikultura, Kementerian Pertanian, dengan tujuan untuk memberi dukungan kepada berbagai *stakeholder* yang menangani pengembangan hortikultura dalam menentukan strategi mitigasi dampak perubahan iklim. Dalam SIPANTARA disajikan informasi iklim, DPI (data banjir dan kekeringan, baik data *real-time* maupun prediksinya), serta data OPT.

Bab XI memuat uraian bagaimana pertanian cerdas iklim atau *climate-smart agriculture* (CSA) menjadi sebuah pendekatan yang dilakukan untuk mencapai pembangunan pertanian berkelanjutan. Pertanian cerdas iklim juga bertujuan untuk menyusun strategi adaptasi yang tepat, serta bagaimana aktivitas pertanian dapat berkontribusi dalam mengatasi permasalahan meningkatnya gas rumah kaca (GRK) di atmosfer dan menetapkan langkah mitigasi yang dapat menurunkan emisi GRK dari praktik sistem pertanian. Konsep pertanian cerdas iklim menjadi makin relevan dalam konteks ketahanan pangan, yang memberikan berbagai strategi untuk mencapai emisi nol dalam sektor pertanian, termasuk praktik pengelolaan yang berkelanjutan dan inovatif. Dengan integrasi teknologi dan

pendekatan yang lebih efisien, kita dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dengan tetap menjaga produktivitas pertanian. Konsep pertanian cerdas iklim juga memungkinkan mengintegrasikan kearifan lokal dengan pendekatan modern dalam menghadapi perubahan iklim. Dalam bab ini diangkat kasus di Lampung Barat, yang memberi wawasan berharga mengenai praktik pertanian cerdas iklim.

Bab XII mendeskripsikan salah satu opsi bagaimana transformasi pertanian padi Indonesia dilakukan. Sistem padi aerobik dapat menjadi pilihan utama jalur transformatif menuju praktik pertanian berkelanjutan yang memiliki relevansi global, memberikan pondasi penting bagi pendekatan pertanian inovatif dalam menghadapi tantangan mendesak pada saat ini dan pada masa depan. Dalam pembahasannya ditunjukkan bahwa emisi metana berkontribusi secara signifikan terhadap pemanasan global dalam konteks pertanian. Budi daya padi, yang sering dilakukan di lahan tergenang, menciptakan kondisi anaerobik yang ideal untuk produksi metana. Data menunjukkan bahwa sektor ini menyumbang sekitar 12% dari emisi metana antropogenik global. Penjelasan mengenai model-model simulasi terkait skenario iklim untuk memprediksi konsentrasi metana, seperti MERES, DAYCENT, DNDC, dan DSSAT, sangat informatif. Masing-masing model memiliki pendekatan unik untuk menyimulasikan emisi metana dari lahan padi dan mempertimbangkan variabel, seperti iklim, tanah, dan praktik pertanian.

Melalui buku ini, diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang pentingnya prediksi iklim dalam mendukung ketahanan pangan. Dengan mengintegrasikan berbagai aspek yang dibahas, kita dapat bersama-sama merumuskan langkah-langkah yang diperlukan untuk menciptakan sistem pertanian yang lebih tangguh, berkelanjutan, dan mampu menghadapi tantangan iklim pada masa depan. Ketahanan pangan tidak hanya menjadi tanggung jawab petani, tetapi juga menjadi tanggung jawab kita bersama sebagai masyarakat untuk menjamin masa depan yang lebih baik bagi generasi yang mendatang.

Referensi

- Alkorta, I., Epelde, L., & Garbisu, C. (2017). Environmental parameters altered by climate change affect the activity of soil microorganisms involved in bioremediation. *FEMS Microbiology Letters*, 364(19). <https://doi.org/10.1093/femsle/fnx200>
- Baldrian, P., López-Mondéjar, R., & Kohout, P. (2023). Forest microbiome and global change. *Nature Reviews Microbiology*, 21(8), 487–501. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00876-4>
- Blanc, E., & Reilly, J. (2017). Approaches to assessing climate change impacts on agriculture: An overview of the debate. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(2). <https://www.journals.uchicago.edu/doi/epdf/10.1093/reep/rex011>
- Charalampopoulos, I., & Droulia, F. (2024). A pathway towards climate services for the agricultural sector. *Climate*, 12(2), 18. <https://doi.org/10.3390/cli12020018>
- Eftekhari, M. S. (2022). Impacts of climate change on agriculture and horticulture. Dalam S. A. Bandh (Ed.), *Climate change: The social and scientific construct* (117–131). Springer.
- Garbisu, C., Alkorta, I., Kidd, P., Epelde, L., & Mench, M. (2020). Keep and promote biodiversity at polluted sites under phytomanagement. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(36), 44820–44834. <https://doi.org/10.1007/S-11356-020-10854-5>
- Hung, H., Halsall, C., Ball, H., Bidleman, T., Dachs, J., De Silva, A., Hermanson, M., Kallenborn, R., Muir, D., Sühring, R., Wang, X., & Wilson, S. (2022). Climate change influence on the levels and trends of persistent organic pollutants (POPs) and chemicals of emerging Arctic concern (CEACs) in the Arctic physical environment – a review. *Environmental Science Processes & Impacts*, 24(10), 1577–1615. <https://doi.org/10.1039/d1em00485a>
- Porter, J. R., & Semenov, M. A. (2005). Crop responses to climatic variation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 360(1463), 2021–2035. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1752>
- Wing, I. S., De Cian, E., & Mistry, M. N. (2021). Global vulnerability of crop yields to climate change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 109, 102462. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102462>

BAB II

Kajian Dampak Perubahan Iklim pada Sektor Pertanian: Upaya Strategis Adaptasi untuk Mendukung Ketahanan Pangan

Woro Estiningtyas, Ai Dariah, Yayan Apriyana,
Elsa Rakhmi Dewi

A. Tantangan Perubahan Iklim

Sektor pertanian merupakan sektor penopang utama pemenuhan kebutuhan pangan rakyat Indonesia dan kebutuhan pangan ini berjalan seiring dengan peningkatan jumlah penduduk. Tahun 2022 jumlah penduduk Indonesia 276 juta jiwa (BPS, 2023), di mana makanan pokoknya sebagian besar adalah beras. Makin meningkatnya jumlah penduduk membawa konsekuensi makin terkurasnya sumber daya alam yang digunakan untuk pemenuhan kebutuhan pangan, energi, dan air. Pemenuhan kebutuhan pangan dan menjaga ketersediaannya secara berkelanjutan di tengah perubahan iklim menjadi tantangan yang harus diatasi oleh pemerintah Indonesia.

W. Estiningtyas*, A. Dariah, Y. Apriyana, & E. R. Dewi
Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail:* woro004@brin.go.id

© 2024 Editor & Penulis

Estiningtyas, W., Dariah A., Apriyana, Y. Dewi, E. R. (2024). Kajian dampak perubahan iklim pada sektor pertanian: Upaya strategis adaptasi untuk mendukung ketahanan pangan. Dalam D. E. Nuryanto & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (15–58). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1244.c1386. E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

Indonesia memiliki iklim yang sangat dinamis. Indonesia juga rentan terhadap kejadian El Niño dan La Niña serta fenomena pemanasan global yang diperkirakan akan terus terjadi dengan gejala yang makin menguat (Aldrian et al., 2023). Selama periode 2014–2023, bencana tanah longsor, banjir, puting beliung, serta kebakaran hutan dan lahan (karhutla) yang merupakan bencana hidrometeorologi dominan terjadi di Indonesia (Gambar 2.1). Pulau-pulau dengan jumlah bencana terbanyak adalah Jawa, Sumatra, Sulawesi, dan Kalimantan (Badan Nasional Penanggulangan Bencana [BNPB], 2023). Pulau-pulau ini sebagian besar merupakan sentra pangan di Indonesia.

Variabilitas iklim sangat memengaruhi pertumbuhan tanaman pangan seperti padi. Pada kondisi normal, semua sumber daya tersebut bersinergi untuk menghasilkan produksi yang optimal didukung dengan teknologi yang sesuai. Sebaliknya, ketika satu atau lebih dari sumber daya tersebut mengalami anomali maka akan berpengaruh terhadap hasil pertanian. Gambar 2.1 menunjukkan jumlah bencana selama periode 2014–2023, yang memberi gambaran bahwa bencana yang berkaitan dengan iklim dan cuaca (banjir, tanah longsor, puting beliung) memiliki proporsi terbesar dalam keseluruhan bencana yang terjadi di Indonesia. Hal ini menjadi tantangan bagi berbagai negara, khususnya Indonesia yang tengah berusaha meningkatkan ketahanan pangan.



Sumber: Dimodifikasi dari BNPB (2023)

Gambar 2.1 Jumlah Bencana Periode 2014–2023

Pertanian, khususnya tanaman pangan, sangat rentan terhadap kejadian iklim ekstrem (Estiningtyas et al., 2021). Berbagai fenomena ekstrem, seperti El Niño dan La Niña, telah mengakibatkan gangguan kegiatan pertanian di Indonesia. Selain itu, perubahan iklim telah memberi implikasi pada peningkatan frekuensi dan intensitas kejadian iklim ekstrem, dengan dampaknya yang memiliki cakupan luas dan beragam. Selain dampak negatif, fenomena perubahan iklim juga memiliki sisi positif yang selama ini kurang banyak diungkap. Sisi positif perubahan iklim tersebut memiliki potensi dan nilai tambah untuk mendukung ketahanan pangan. Dengan adanya dampak positif dan dampak negatif dari perubahan iklim tersebut, dibutuhkan upaya dan strategi adaptasi untuk meminimalisasi kerusakan yang terjadi dan meraih secara maksimal sisi positif dari perubahan iklim yang terjadi di Indonesia.

Bab ini membahas berbagai dampak perubahan iklim pada pertanian, baik positif maupun negatif, khususnya pada tanaman pangan dan melihat keterkaitannya dengan strategi adaptasi serta implikasinya untuk mendukung ketahanan pangan. Bahasan ini diharapkan dapat menjadi rujukan dalam merumuskan strategi dan kebijakan terkait dampak perubahan iklim dan ketahanan pangan. Hal ini dibangun dari penelusuran berbagai literatur dan dialog dengan para pemangku kepentingan serta analisis data. Hasil penelusuran literatur yang dilakukan penulis disampaikan dalam bab ini untuk membangun pemahaman pembaca mengenai keterhubungan antara ketahanan pangan dan perubahan iklim. Selain itu, disampaikan pula bagaimana proyeksi iklim dalam beberapa periode mendatang dan dampaknya pada sumber daya air, sumber daya lahan, produktivitas tanaman pangan, serta dampak serangan organisme pengganggu tanaman (OPT). Dengan ditunjang juga oleh bahasan mengenai sisi positif dampak perubahan iklim, dikembangkan bagaimana peran strategis adaptasi dalam menjamin ketahanan pangan. Temuan utama dari hasil penggalian informasi dan analisis data, telah digunakan penulis sebagai dasar dalam penyusunan rekomendasi untuk dapat

merespons tantangan perubahan iklim yang terjadi terhadap upaya-upaya peningkatan ketahanan pangan di Indonesia.

B. Ketahanan Pangan

Konsep ketahanan pangan pertama kali muncul pada tahun 1943 sebagai hasil Konferensi Pangan dan Pertanian yang bertujuan untuk mencapai pasokan pangan yang aman, memadai, dan sesuai untuk semua orang. Sejak saat itu, definisi dan paradigma ketahanan pangan terus mengalami evolusi dan perubahan (Suharyanto, 2011). Definisi umum yang sering digunakan bersumber dari World Bank (1986) serta Maxwell dan Frankenberger (1992), yaitu akses yang aman setiap saat terhadap kecukupan pangan untuk hidup sehat. Definisi dari FAO (1996) menyebutkan ketahanan pangan sebagai situasi di mana semua rumah tangga mempunyai akses, baik fisik maupun ekonomi, untuk memperoleh pangan bagi seluruh anggota keluarganya, di mana rumah tangga tidak berisiko mengalami kehilangan kedua akses tersebut. Menurut Undang-Undang Pangan Nomor 7 Tahun 1996, ketahanan pangan didefinisikan sebagai “kondisi terpenuhinya kebutuhan pangan bagi rumah tangga yang tercermin dari tersedianya pangan secara cukup, baik dari jumlah maupun mutunya, aman, merata, dan terjangkau”.

Produksi pangan, khususnya padi yang tersedia secara cukup serta berkelanjutan, menjadi jaminan ketahanan pangan nasional. Data historis produksi padi yang bersumber dari FAO selama 30 tahun (1990–2020) di Indonesia menunjukkan bahwa produksi padi sangat dipengaruhi oleh kejadian iklim ekstrem El Niño dan La Niña (Gambar 2.2). Pada tahun di mana terjadi fenomena El Niño dan La Niña, terjadi penurunan produksi padi. Hal ini disebabkan munculnya kedua fenomena iklim ekstrem tersebut mengakibatkan banjir dan kekeringan sehingga luas tanam dan luas panen padi berkurang yang pada akhirnya akan mengurangi produksi.



Sumber: Aldrian et al. (2022)

Gambar 2.2 Anomali Produksi Padi di Indonesia Periode 1990–2020

Ketahanan pangan dalam konteks perubahan iklim dapat ditinjau dari sejauh mana usaha tani dapat dilakukan dengan risiko dan kerugian yang minimal. Informasi sebaran tingkat kerentanan usaha tani menjadi penting untuk mengetahui lokasi dan tingkat kerentanan agar dapat diidentifikasi faktor determinan yang berkontribusi besar terhadap tingkat kerentanan (Estiningtyas et al., 2024). Hasil penelitian Estiningtyas et al. (2016) menunjukkan bahwa Pulau Jawa sebagai sentra produksi padi memiliki kabupaten di mana usaha tani pangan-nya rentan terhadap kejadian iklim ekstrem. Terdapat 5 kabupaten yang memiliki tingkat kerentanan ekstrem tinggi, yaitu Kabupaten Pandeglang, Lebak, Tangerang, Serang, dan Situbondo. Sementara itu, ada sekitar 18 kabupaten dengan tingkat kerentanan sangat tinggi, dan 13 kabupaten dengan tingkat kerentanan tinggi (Gambar 2.3). Hasil tersebut memberi gambaran bahwa wilayah dengan kerentanan pangan tinggi, sangat tinggi, dan ekstrem tinggi menjadi prioritas dalam penanganan usaha taninya untuk keberlangsungan ketahanan pangan.



Sumber: Estiningtyas et al. (2016)

Gambar 2.3 Peta Kerentanan Usaha Tani Pangan serta Risiko Banjir dan Kekeringan Kabupaten/kota di Pulau Jawa

C. Proyeksi Perubahan Iklim dan Dampaknya

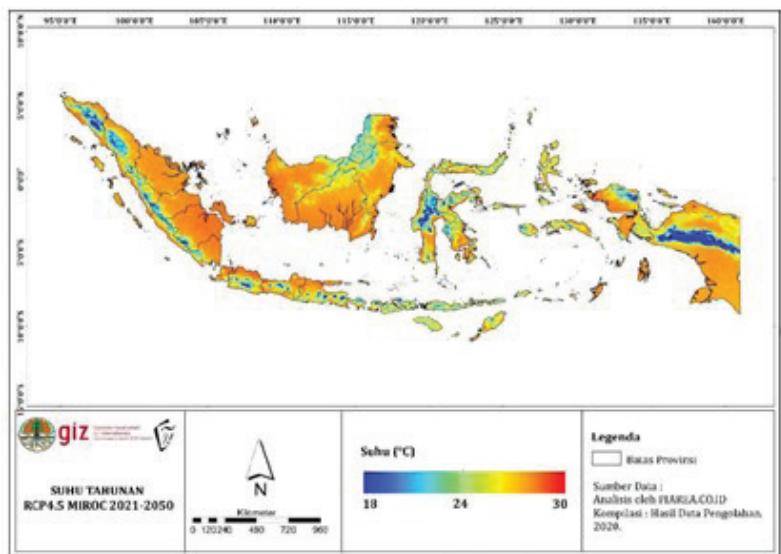
Pembahasan dalam subbab ini menyoroti fenomena perubahan iklim dari dua pendekatan, yaitu (1) proyeksi iklim berdasarkan skenario perubahan iklim Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan gambaran kondisi suhu dan curah hujan puluhan hingga ratusan tahun ke depan. Pilihan skenario RCP 4.5 didasarkan pada optimisme dan harapan bahwa skenario tersebut dapat mencerminkan penurunan *radiative forcing* pada masa depan melalui adaptasi perubahan iklim (Perdinan, 2019); (2) dampak perubahan iklim pada beberapa sumber daya yang terkait sektor pertanian, yaitu sumber daya air, sumber daya lahan, dan produktivitas tanaman pangan utama padi, jagung, dan kedelai (pajale).

Buku ini tidak diperjualbelikan.

1. Proyeksi Iklim

Salah satu indikator perubahan iklim hasil proyeksi adalah suhu udara dan curah hujan. Keduanya sangat penting dalam sistem pertanian. Suhu udara berperan dalam proses evapotranspirasi dan fisiologis tanaman, sedangkan curah hujan menjadi salah satu sumber air yang dibutuhkan tanaman untuk melakukan fotosintesis. Berdasarkan proyeksi RCP 4.5 menggunakan model The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) dan The Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC) untuk periode 2021–2050, terdapat proyeksi perubahan suhu yang ekstrem di beberapa wilayah di Indonesia. Wilayah-wilayah tersebut meliputi Jawa Barat, pesisir Utara Banten, Jawa Tengah, Jawa Timur, Kalimantan Barat, Kalimantan Tengah, Riau, Sumatra Selatan dan Lampung, serta Papua. Rentang suhu ekstrem yang diproyeksikan antara 28°C–30°C (Gambar 2.4) (KLHK, 2020). Berdasarkan studi yang dilakukan Susandi (2006) dengan menerapkan skenario A2/Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), diperkirakan terjadi peningkatan suhu sebesar 2,9°C di Indonesia hingga tahun 2100. Dampak dari perubahan tersebut akan dirasakan secara meluas di sebagian besar wilayah Nusa Tenggara Timur dan Kalimantan.

Berdasarkan proyeksi suhu RCP 4.5 untuk periode 2026–2050, suhu maksimum, suhu minimum, dan suhu rata-rata mengalami peningkatan di berbagai pulau di Indonesia. Pulau-pulau tersebut meliputi Pulau Sumatra, Jawa, Sulawesi, Kalimantan, Bali, Maluku, Nusa Tenggara, dan Papua (Tabel 2.1) (Perdinan, 2019). Sebagai perbandingan, hasil kajian Kementerian PPN/Bappenas (2021) menunjukkan bahwa proyeksi iklim di Indonesia berdasarkan skenario RCP 4.5 memperlihatkan kenaikan suhu mencapai 1,5°C pada tahun 2100.



Sumber: KLHK (2020)

Gambar 2.4 Proyeksi Rata-Rata Suhu Tahunan 2021–2050

Tabel 2.1 Proyeksi Suhu Udara 2026–2050 di Indonesia

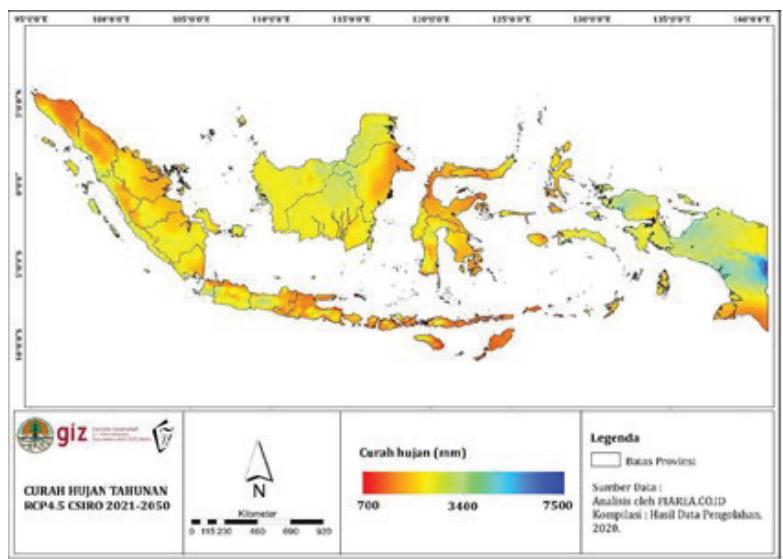
Lokasi	Kenaikan Suhu Udara		
	Suhu Rata-rata	Suhu Maksimum	Suhu Minimum
Sumatra dan Jawa	0,6–1°C	0,75–2,25°C	0,2–1,0°C
Kalimantan dan Sulawesi	0,2–0,9°C	0,5–2,25°C	0,2–1,0°C
Bali dan Nusa Tenggara	1,6–2°C	0,5–2,25°C	0,2–1,0°C
Maluku dan Papua	1,1°C	0,5–2,25°C	0,2–1,0°C

Sumber: Perdinan (2019)

Untuk proyeksi curah hujan berdasarkan RCP 4.5 CSIRO memperlihatkan adanya perubahan di beberapa wilayah Indonesia dan diperkirakan terjadi penurunan curah hujan di Sumatra Utara dan wilayah Aceh selama Desember–Januari–Februari (DJF), Jawa Barat, Banten, dan Jawa Tengah pada bulan Agustus, serta pada Juni–Juli–Agustus (JJA) di Selatan Papua. Namun, di beberapa wilayah lainnya terjadi peningkatan curah hujan ekstrem, yaitu di wilayah

Kalimantan Barat, Kalimantan Tengah, dan Papua. Selain itu, proyeksi juga menunjukkan bahwa peningkatan jumlah hari tanpa hujan akan lebih sering terjadi di wilayah Jawa Timur, Aceh, dan bagian selatan Papua (Gambar 2.5) (KLHK, 2020). Hasil penelitian Susandi (2006) juga mengindikasikan bahwa penurunan curah hujan yang paling ekstrem terjadi di bagian timur Pulau Sumatra, wilayah utara Pulau Jawa, bagian selatan Kalimantan, dan Sulawesi.

Hasil kajian Perdinan (2019) menunjukkan bahwa berdasarkan proyeksi curah hujan dengan skenario RCP 4.5 untuk periode 2026–2050, terdapat variasi peningkatan dan penurunan curah hujan di berbagai wilayah, baik secara tahunan maupun musiman. Peningkatan curah hujan tahunan berkisar 5%–10%, sedangkan penurunan curah hujan berkisar 5%. Untuk curah hujan musiman, terdapat peningkatan berkisar 10%–30%, sedangkan penurunan berkisar 4%–40%. Informasi lebih rinci untuk setiap lokasi dapat dilihat pada Tabel 2.2.



Sumber: KLHK (2020)

Gambar 2.5 Rataan Curah Hujan Tahunan Periode 2021–2050

Variabilitas curah hujan ekstrem diproyeksikan akan lebih tinggi dan hal ini dapat berarti bahwa peluang kejadian iklim ekstrem kering dan ekstrem basah di atas normal akan menjadi lebih besar. Proyeksi dengan skenario RCP 4.5 juga menunjukkan bahwa sebagian wilayah di Indonesia akan mengalami perpanjangan durasi musim kemarau dan penurunan intensitas curah hujan. Hal ini memiliki dampak pada peningkatan risiko kekeringan dan kemungkinan penurunan ketersediaan air. Perpanjangan musim kemarau berimplikasi pada perubahan fisiologis tanaman padi yang pada akhirnya berkontribusi terhadap peningkatan risiko penurunan produksi padi. Pada bagian selanjutnya akan ditunjukkan penilaian dampak dipilih untuk bidang yang banyak terkait dengan pertanian, yaitu sumber daya air, lahan, dan produktivitas.

Tabel 2.2 Proyeksi Curah Hujan 2026–2050 di Indonesia

Lokasi	Tahunan	Musiman			
		DJF	MAM	JJA	SON
Sumatra	Meningkat hingga 5%	Turun 10%			Turun
Jawa	Menurun hingga 5%	Turun 20%–40%	Turun 4%	Turun	Turun 8%
Kalimantan	Meningkat hingga 5%	Naik 20%			Turun Naik
Sulawesi	Menurun hingga 5%	Turun 8%–30%	Naik 11%–30%	Turun	-
Bali dan Nusa Tenggara	Menurun hingga 5%	Turun 20%	-	-	-
Maluku	Meningkat hingga 5%	Turun 10%	-	-	-
Papua	Meningkat hingga 10%	Naik 10%–20%	-	-	-

Sumber: Perdinan et al. (2019)

2. Dampak Perubahan Iklim terhadap Produktivitas Pertanian

Peningkatan produktivitas pertanian merupakan salah satu sasaran untuk mencapai ketahanan pangan nasional. Produktivitas pertanian

itu sendiri ditentukan oleh banyak faktor, antara lain faktor produksi, faktor bahan tanaman, faktor esensial (cahaya, air, dan unsur hara), faktor iklim, faktor gangguan (hama, penyakit, dan gulma), faktor lahan (luas lahan), penggunaan pupuk, dan biaya produksi. Dari faktor-faktor tersebut, sebagian sangat ditentukan oleh kondisi iklim. Bahasan dalam bab ini lebih ditekankan pada dampak perubahan iklim yang ditinjau dari perubahan curah hujan dan suhu udara sebagai paramater iklim yang erat hubungannya dengan pertanian terhadap sumber daya air, sumber daya lahan, produksi pangan (padi, jagung, kedelai) dan gangguan hama.

Kondisi sumber daya air pertanian, sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan iklim. Kejadian iklim ekstrem, seperti El Niño yang berdampak kekeringan dan La Niña yang berdampak berupa banjir, merupakan dua kejadian utama yang berpengaruh terhadap ketersediaan air. Intensitas, jumlah, dan pola curah hujan berdampak terhadap pola dan debit air (*water yield*) musiman di daerah aliran sungai (DAS) dan ketersediaan air di waduk (Rejekiningrum, 2014). Perubahan iklim akibat aktivitas manusia (antropogenik) juga berdampak pada ketersediaan dan kerentanan sumber daya air di Indonesia (Pawitan, 2011). Studi di DAS Brantas menunjukkan bahwa dalam rentang waktu 50 tahun, terjadi peningkatan jumlah bulan dengan curah hujan ekstrem, terutama di daerah yang berdekatan dengan pantai (Aldrian & Djamil, 2006). Perubahan pola curah hujan ini berpeluang pula terjadi di DAS lainnya di Indonesia dan memengaruhi kondisi sumber daya air yang ada. Irrigasi pertanian merupakan pengguna sumber daya air yang terbesar (90,18%). Namun, berdasarkan data dari Direktorat Jenderal Sumber Daya Air (2015), sekitar 46% jaringan irigasi di Indonesia telah rusak sehingga gangguan akibat kejadian iklim ekstrem akan berdampak terhadap ketahanan pangan. Oleh karena itu, peranan sektor pertanian lebih diarahkan kepada peningkatan fungsi irigasi secara efisien untuk mendukung ketahanan pangan.

Faktor lain yang menentukan kinerja pertanian dan ketahanan pangan adalah kondisi lahan. Suhu dan curah hujan merupakan

indikator perubahan iklim yang memiliki pengaruh signifikan terhadap sumber daya lahan. Peningkatan suhu udara yang berlebihan dapat memicu kebakaran hutan dan lahan (karhutla). Pada periode Juni 1982 hingga Mei 1983, curah hujan hanya mencapai 30%–35% dari rata-rata normal dan suhu udara mencapai tingkat sangat tinggi (sekitar 3°C di atas normal) yang mengakibatkan terjadinya kebakaran lahan seluas 3,2 juta hektare dan kebakaran hutan seluas 2,7 juta hektare (Ridwan & Hendri, 2001). Selain itu, pada tahun 2015, El Niño yang kuat juga memicu karhutla yang signifikan, menghanguskan sekitar 2,5 juta hektare (ha) hutan dan lahan di Indonesia (Arif, 2023).

Dampak jangka panjang kebakaran hutan dan lahan terhadap tanah dapat memengaruhi interaksi antara tanah, vegetasi, serta lingkungan biotik dan abiotik. Menurut Sahardjo (2000), dalam siklus kebakaran yang berulang, terjadi perubahan yang signifikan pada sifat-sifat tanah, yang dapat mengubah hutan dataran rendah menjadi alang-alang dan merusak struktur tanah. Ketika terjadi hujan, tanah akan menerima dampak kuat karena tidak ada pepohonan yang dapat menahan energi hujan, menyebabkan hilangnya lapisan tanah serta bahan organik karena terbawa oleh aliran permukaan sehingga meningkatkan risiko erosi dan membuat tanah menjadi kritis (Schulze, 2000). Kehilangan nutrien dari tanah diperkirakan sekitar 5%–50% dari total kandungan yang tersimpan dalam biomassa tanaman akibat kebakaran hutan (Schindele et al., 1989). Selain itu, nutrien dalam tanah akan mengalami kehilangan melalui beberapa mekanisme saat terjadi kebakaran hutan (Sjarmidi & Aryantha, 1997). Menurunnya tingkat kesuburan tanah akan berpengaruh terhadap kualitas dan produksi tanaman. La Niña juga berpotensi meningkatkan erosi yang disebabkan oleh hujan yang lebih intensif seiring dengan peningkatan aliran permukaan. Akibatnya, risiko banjir meningkat dan bisa menyebabkan terendamnya lahan pertanian.

Ketersediaan dan keberlanjutan pangan di Indonesia juga ditopang melalui tanaman pangan yang ditanam di lahan gambut. Potensi kebakaran tertinggi akibat kejadian iklim ekstrem juga terjadi pada lahan gambut terutama lahan gambut yang telah dibuka dan

didrainase. Pada saat kekeringan di mana curah hujan rendah dapat menyebabkan material gambut, serasah, dan pohon-pohon menjadi kering, yang memicu potensi kebakaran hutan karena tersedianya banyak bahan bakar yang mudah terbakar (Barani et al., 2022). Tanah gambut terbentuk dari bahan organik, seperti sisa-sisa tanaman yang belum sepenuhnya terdekomposisi. Hal ini berbeda dengan karakteristik tanah mineral. Oleh karena itu, tanah gambut cenderung lebih rentan terbakar ketika mengalami kekeringan. Salah satu sifat khas tanah gambut adalah sulit untuk kembali basah setelah mengering, yang disebut sebagai *irreversible drying* sehingga membuatnya lebih rentan terhadap kebakaran. Tingkat kerawanan lahan gambut terhadap kebakaran pada kondisi curah hujan rendah ditunjukkan dari hasil studi Maswar et al. (2016) terhadap data sebaran *hotspot* (yang merupakan indikasi kejadian kebakaran hutan dan lahan) tahun 2015, di mana umumnya *hotspot* dominan terjadi pada provinsi dengan lahan gambut luas, yaitu Jambi, Riau, Sumatra Selatan, Kalimantan Barat, Kalimantan Tengah, Kalimantan Timur, dan Papua. Selain itu, kebakaran lahan gambut memiliki dampak yang signifikan terhadap pelepasan karbon yang tersimpan dalam tanah. Hal ini menyebabkan emisi gas rumah kaca (GRK) meningkat signifikan dan berkontribusi pada penurunan laju subsiden lahan gambut. Akibatnya, fungsi lahan gambut sebagai penyimpan dan penampung air serta fungsi-fungsi lainnya terganggu dan berdampak terhadap ketersediaan pangan.

Padi, jagung, dan kedelai (pajale) merupakan jenis produk pertanian andalan untuk meningkatkan stabilitas ketahanan dan keamanan pangan nasional. Seperti telah disampaikan pada bagian sebelumnya, sektor pertanian sangat terdampak oleh fenomena ekstrem, seperti La Niña dan El Niño (ENSO), dalam hal produktivitas tanaman pangan. El Niño dan La Niña serta serangan OPT dapat mengurangi luas tanam dan produksi, terutama pajale. Perubahan pola dan intensitas curah hujan serta peningkatan suhu udara memiliki dampak yang signifikan terhadap durasi musim, yaitu musim kemarau (MK) yang makin panjang dan musim hujan (MH) yang lebih pendek, atau sebaliknya.

Dampak perubahan iklim memberikan implikasi yang tidak sama pada produksi tanaman pangan di Indonesia karena variasi spasial di berbagai wilayah. Akibat perubahan iklim, produktivitas padi turun 0,5%–1,37%, (Perdinan et al., 2018a). Kenaikan suhu udara 1°C dan curah hujan yang meningkat 5% dapat mengakibatkan penurunan produktivitas padi sebesar 0,53 ton per hektare, sedangkan dengan kenaikan suhu udara sebesar 1,5°C dan curah hujan yang meningkat sebesar 35%, produktivitas padi mengalami penurunan sebesar 0,57 ton per hektare (Hosang et al., 2012). Peningkatan suhu udara akan mengganggu proses biologis tanaman yang meliputi fotosintesis, transpirasi, dan tingkat respirasi. Proses-proses ini memiliki peran krusial dalam menentukan tingkat produktivitas. Temuan dari studi yang dilakukan oleh Boer (2011) di DAS Brantas, Jawa Timur, menunjukkan bahwa banjir atau kekeringan pada lahan sawah dapat menyebabkan penurunan hasil panen hingga 5,2 ton/ha. Contoh kasus di Pulau Jawa dan Bali menunjukkan bahwa akibat perubahan musim dan peningkatan kejadian iklim ekstrem yang makin sering terjadi dengan awal musim hujan yang mengalami penundaan sekitar 30 hari (Naylor et al., 2007) menyebabkan gangguan ketersediaan pangan.

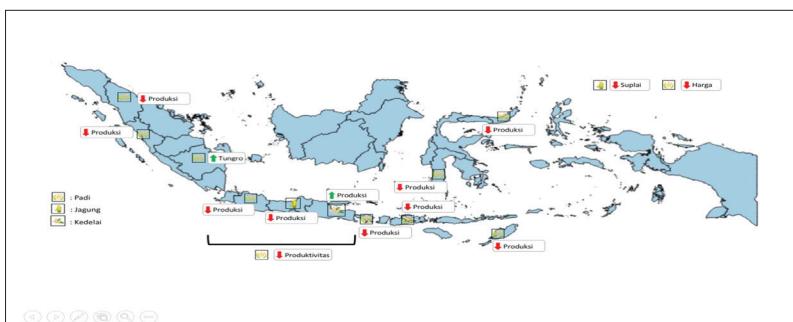
Ketersediaan pangan juga dipengaruhi oleh serangan OPT, di mana keberadaan OPT ini juga dipengaruhi oleh perubahan iklim berupa peningkatan suhu dan konsentrasi CO_2 . Hal ini berimplikasi pada dinamika populasi serangga/hama tanaman, distribusi geografis, serta meningkatkan risiko serangan OPT yang lebih luas (Wiyono, 2007). Peningkatan suhu dan konsentrasi CO_2 juga menyebabkan peningkatan nafsu makan dan pertumbuhan serangga/hama tanaman yang menyebabkan ledakan populasi (Abrol, 2013). Peningkatan curah hujan pada musim kemarau menyebabkan pertumbuhan populasi wereng batang coklat (WBC) yang cepat. Berdasarkan data luas serangan WBC periode 1989–2019, peningkatan curah hujan pada tahun-tahun La Niña menyebabkan peningkatan area yang terkena serangan WBC tiga kali lipat dari tahun normal dan cenderung terjadi lebih sering pada musim hujan dalam kondisi normal. Perubahan iklim dapat menyebabkan kerusakan pada tanaman dan

mengakibatkan penurunan produksi sebesar 12,6% akibat serangan penyakit dan 15,2% akibat serangan hama (Susanti et al., 2018). Hal yang sama, dinamika kerusakan padi akibat WBC yang sangat dipengaruhi oleh peningkatan suhu dan curah hujan pada musim kemarau pada kejadian La Niña juga telah diteliti oleh Surmaini et al. (2023).

Dampak perubahan iklim pada produksi tanaman pangan, dapat juga terjadi melalui perubahan pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Kejadian iklim ekstrem yang dapat mengakibatkan kejadian banjir dan kekeringan juga cenderung lebih banyak terjadi pada tipe iklim monsun yang berada di wilayah Jawa, sebagian Kalimantan, dan Sumatra yang merupakan sentra pangan di Indonesia (Perdinan et al., 2014). Menurut Kementerian PPN/Bappenas (2021), penurunan produksi padi lebih dari 25% akan terjadi pada periode 2020–2045 di Provinsi Kalimantan Utara, Maluku, Gorontalo, dan Maluku Utara. Sentra produksi beras Pulau Jawa dan Sumatra diperkirakan juga akan mengalami penurunan produksi 10%–17,5%. Diperkirakan potensi kerugian ekonomi nasional pada sektor pertanian bisa mencapai 77,9 triliun rupiah.

Dampak perubahan iklim pada produksi tanaman pangan, dapat juga terjadi melalui perubahan pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Hoogenboom, 2000; Motha & Baier, 2005; Tubiello et al., 2007). Untuk aspek pangan, khususnya pajale, hasil proyeksi dampak perubahan iklim menunjukkan ada beberapa wilayah yang akan mengalami penurunan produksi dan peningkatan serangan OPT (tungro). Namun, ada juga beberapa wilayah yang mengalami peningkatan produksi (Gambar 2.6). Akibat anomali suhu dan curah hujan, diproyeksikan akan terjadi penurunan produksi padi hingga 50% ketika suhu naik 1°C–2,5°C dan curah hujan turun hingga 5%–25%. Untuk tanaman jagung, ketika terjadi peningkatan curah hujan 10%, diperkirakan akan terjadi penurunan suplai jagung hingga 0,98%. Sementara itu, untuk kedelai diproyeksikan akan terjadi peningkatan produktivitas mendekati 27,3% ketika curah hujan meningkat 50 mm/bulan (Tabel 2.3).

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Apriyana et al. (2016), diproyeksikan hingga tahun 2050 akan terjadi penurunan produksi padi gogo di Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Nusa Tenggara Timur mencapai 20%–25%. Namun, dengan menerapkan strategi adaptasi, penurunan produksi dapat ditekan menjadi sekitar 7%–10%. Di ketiga provinsi tersebut juga terjadi penurunan produksi jagung 9%–15% hingga tahun 2050. Namun, dengan melakukan adaptasi, penurunan produksi jagung dapat ditekan menjadi 5%–8%. Dampak dan proyeksi dampak terhadap produksi pajale memberi gambaran bahwa risiko terhadap penurunan hasil masih akan terus terjadi bila tidak ada upaya antisipasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim. Risiko dan penurunan hasil pajale sebagai sumber pangan utama tentu berpengaruh terhadap ketahanan pangan.



Sumber: Perdinan et al. (2019)

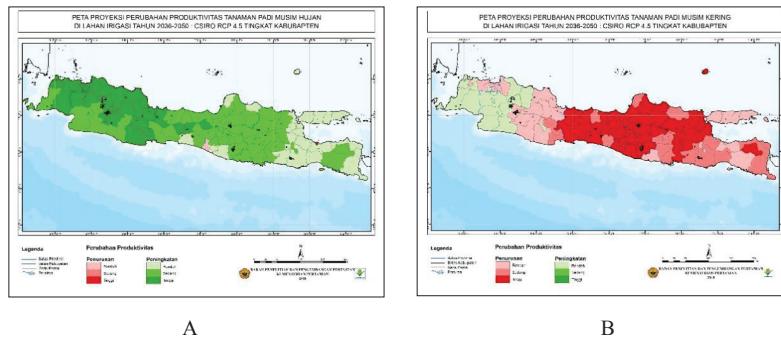
Gambar 2.6 Proyeksi Dampak Perubahan Iklim pada Subsektor Pangan

Tabel 2.3 Proyeksi Dampak Perubahan Iklim pada Padi, Jagung, dan Kedelai

Komoditas	Variabel Iklim	Nilai Ambang dan Dampak
Padi	Curah hujan	Penurunan produksi hingga 50% ketika suhu naik 1°C–2,5°C, dan curah hujan turun hingga 5%–25%
	Suhu	
Jagung	Curah hujan	Penurunan suplai jagung hingga 0,98% ketika terjadi peningkatan curah hujan 10% (jagung membutuhkan curah hujan sekitar 85–200 mm/bulan)
Kedelai	Curah hujan	Peningkatan produktivitas mendekati 27,3% ketika curah hujan meningkat 50 mm/bulan

Sumber: Perdinan et al. (2019)

Hasil proyeksi pada musim hujan periode 2036–2050 di seluruh Pulau Jawa menunjukkan adanya peningkatan produktivitas padi berdasarkan skenario perubahan iklim. Peningkatan tertinggi akan terjadi di Provinsi Jawa Barat dan Banten, yaitu lebih besar dari 20%. Peningkatan produktivitas tersebut disebabkan oleh peningkatan curah hujan hingga 6 mm/hari dan peningkatan penyinaran matahari sebesar 0–5 MJ/m²/hari. Kondisi air yang cukup dengan penyinaran yang melimpah memungkinkan terjadinya proses fotosintesis yang maksimal. Peningkatan produktivitas padi sawah di Provinsi Jawa Tengah, DIY, dan Jawa Timur berkisar antara 10%–20% (Gambar 2.7 kiri). Pada MK 2036–2050, sebagian besar Jawa Barat dan Banten akan mengalami peningkatan kecil hingga 10%. Perubahan curah hujan antara dua musim (MH dan MK) sedikit kecil dan disertai dengan penurunan radiasi dan peningkatan suhu yang dapat menyebabkan penurunan produktivitas (Gambar 2.7B) (Susanti et al., 2021).



Sumber: Susanti et al. (2021)

Gambar 2.7 Proyeksi Perubahan Produktivitas Padi Irigasi MH (A) dan MK (B) Periode 2036–2050 untuk Skenario RCP 4.5 Menggunakan Model CSIRO MK3.6

Untuk mengetahui secara detail kondisi sumber daya air, lahan, dan serangan OPT di Indonesia pada periode 2026–2050, diperlukan dukungan riset yang kuat, mengingat adanya variasi proyeksi curah hujan 2026–2050 di Indonesia (Tabel 2.2) dan respons lingkungan yang juga bervariasi karena perbedaan kondisi geologis dan topografi.

Dengan demikian, data prediksi iklim menjadi kebutuhan yang kritis. Akurasi prediksi kondisi sumber daya air untuk pertanian akan ditentukan oleh seberapa tinggi akurasi prediksi curah hujan yang menjadi input dalam aplikasi tersebut.

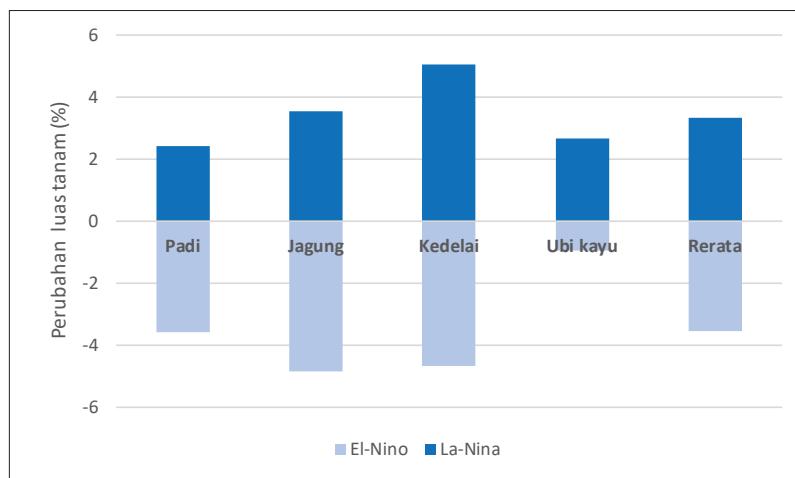
D. Sisi Positif Dampak Perubahan Iklim

Dampak negatif dari perubahan iklim merupakan permasalahan yang selama ini paling banyak dibahas (Reuter & Dariah, 2019; Dariah et al., 2022), padahal ada sisi positif dari perubahan iklim yang bisa dimanfaatkan dan memberi keuntungan pada sektor pertanian, terutama jika sudah mempunyai kemampuan untuk beradaptasi. Perubahan iklim dapat berdampak positif terhadap ketahanan pangan. Hasil penelitian Yang et al. (2015) menyimpulkan bahwa telah terjadi peningkatan sebesar 2,2% dalam produksi nasional tiga tanaman utama (jagung, gandum, dan beras) selama periode 1981–2010 yang berdampak positif pada ketahanan pangan Tiongkok yang diadaptasi secara bersamaan dalam berbagai sistem pertanian. Peningkatan tersebut diduga berkaitan dengan peningkatan CO_2 di atmosfer, perubahan suhu udara, dan perubahan curah hujan di Tiongkok.

Peningkatan konsentrasi CO_2 di atmosfer pada batas tertentu berdampak positif terhadap metabolisme tanaman. Hasil panen diperkirakan akan meningkat dan perubahan perkembangan tanaman bergantung pada jenis tanaman. Namun, dampak menguntungkan dari peningkatan CO_2 ini kemungkinan besar akan diimbangi dengan peningkatan suhu dan perubahan curah hujan (DaMatta et al., 2010). Analisis sensitivitas menggunakan CERES (estimasi tanaman melalui sintesis sumber daya dan lingkungan) menunjukkan bahwa hasil gandum dan beras di barat laut India berpotensi meningkat masing-masing sebesar 28% dan 15%, dengan tingkat CO_2 dua kali lipat. Selain itu, akan ada peningkatan hasil panen padi dan gandum masing-masing sebesar 21% dan 4% jika penjadwalan irigasi yang diikuti saat ini diperaktikkan (Lal et al., 1998).

Fenomena La Niña merupakan peluang bagi sektor pertanian untuk meningkatkan produksi karena bertambahnya luas panen

akibat peningkatan curah hujan sehingga menambah ketersediaan air. Di Indonesia, sisi positif perubahan iklim ditunjukan dari hasil studi Irawan (2013), khususnya pada La Niña periode 1970–2010 terhadap beberapa tanaman pangan utama, yaitu pajale dan ubi kayu (Gambar 2.8). Kejadian La Niña pada periode tersebut telah menyebabkan peningkatan persentase luas tanam pajale dan ubi kayu rata-rata sebesar 3,33%, tertinggi terjadi pada tanaman kedelai sebesar 5,07%, terendah terjadi pada tanaman padi, yaitu sebesar 2,43%. Berbeda dengan La Niña, pada kejadian El Niño, luas panen pajale dan ubi kayu tersebut mengalami penurunan. Rata-rata penurunan luas panen sekitar 3,55%. Penurunan luas panen terbesar terjadi pada tanaman jagung, yaitu sebesar 4,85%, sedangkan terkecil terjadi pada tanaman ubi kayu sebesar 0,95%.

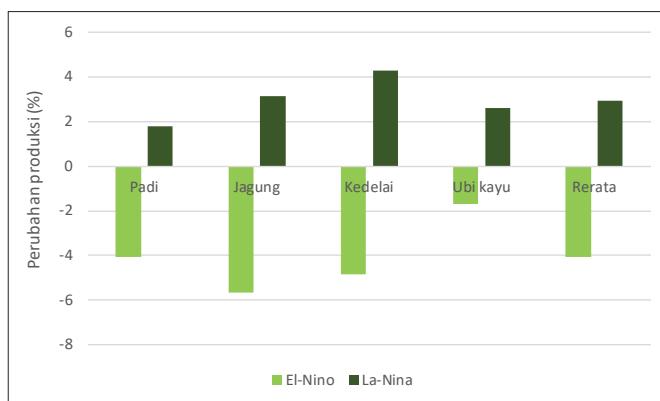


Sumber: Irawan et al. (2013)

Gambar 2.8 Dampak La Niña dan El Niño terhadap Perubahan Luas Panen Tanaman Padi, Jagung, Kedelai, dan Ubi Kayu Periode 1970–2010

Berdasarkan temuan yang dilaporkan oleh Irawan (2006), dampak positif dari La Niña lebih signifikan pada hasil tanaman di lahan kering yang sangat bergantung pada curah hujan, dibandingkan

tanaman yang ditanam di lahan sawah. Dampak positif La Niña berupa peningkatan produksi tanaman pajale dan ubi kayu, dengan rata-rata peningkatan produksi sekitar 2,95%. Peningkatan tertinggi terjadi pada tanaman kedelai, yaitu sekitar 4,29%, sedangkan terendah terjadi pada tanaman padi, yaitu rata-rata 1,78%. Sebaliknya pada kejadian El Niño, produksi pajale dan ubi kayu mengalami penurunan sebesar 4,07%. Tertinggi terjadi pada tanaman jagung, yaitu sebesar 5,67%, dan terendah terjadi pada ubi kayu sebesar 1,76% (Gambar 2.9).



Sumber: Irawan et al. (2013)

Gambar 2.9 Dampak El Niño dan La Niña terhadap Produksi Tanaman Padi, Jagung, Kedelai, dan Ubi Kayu Periode 1970–2010

Peningkatan produksi yang terjadi pada La Niña lebih disebabkan karena pertambahan luas panen bukan dampak dari perubahan produktivitas tanaman karena baik pada kejadian La Niña maupun El Niño, rata-rata produktivitas dari pajale dan ubi kayu mengalami penurunan. Pada saat kejadian El Niño, penurunan produktivitas tanaman padi dan palawija terjadi karena kurangnya suplai air, sedangkan pada kejadian La Niña penurunan produktivitas terjadi utamanya karena eksplosi serangan OPT dan atau kelebihan pasokan air termasuk kejadian banjir (Irawan, 2013).

Manfaat positif dari El Niño dapat diraih pada lahan pasang surut atau lebak, di mana pada saat MK dapat dilakukan penanaman pada area yang biasanya tergenang dengan menggunakan sistem surjan. Sistem surjan adalah bentuk penataan lahan pasang surut untuk antisipasi perubahan iklim. Sistem ini memiliki perspektif ekonomi, ekologi, dan budaya yang memadukan inovasi teknologi terkini dengan kearifan lokal (Susilawati & Nursyamsi, 2014). Pada saat kondisi normal, sekitar 564.200 ha total luas lahan rawa lebak dapat dimanfaatkan. Surutnya air rawa pada saat El Niño menambah luas panen sebesar 237.700 ha sehingga pada MK total luas lahan rawa yang dapat dimanfaatkan adalah 801.900 ha. Pemanfaatan lahan rawa lebak memberikan potensi kontribusi sekitar 14% terhadap produksi beras nasional (atau 6–8 juta ton dengan tingkat produktivitas 4 ton/ha) gabah kering giling (GKG) (Purba, 2015). Produksi padi selama ini bertumpu pada lahan sawah irigasi dan lahan sawah tada hujan. Ekosistem lahan rawa bisa menyelamatkan dan menyubstitusi dampak akibat tekanan kekurangan air saat kemarau yang menyebabkan produksi berkurang di lahan sawah irigasi. Bulan April–September yang merupakan musim kemarau di Indonesia pada umumnya menyebabkan terganggunya suplai beras pada Juli, Agustus, dan September. Lahan rawa lebak yang bisa dimanfaatkan pada saat kemarau bisa memberikan kompensasi kekurangan tersebut. Adapun sebaran lokasi lahan rawa lebak yang berpeluang untuk peningkatan luas tanam pada saat musim kemarau adalah di Provinsi Sumatra Selatan (368.700 ha), Riau (113.600 ha), Lampung (137.900 ha), dan Kalimantan Selatan (181.600 ha). Dampak positif perubahan iklim juga ditunjukkan dari berbagai hasil penelitian berupa peningkatan luas tanam, luas panen, dan produksi (Tabel 2.4).

Hasil studi ini menunjukkan peluang untuk memanfaatkan sisi positif dari perubahan iklim sangat terbuka jika kemampuan adaptasi dari sektor pertanian terus ditingkatkan. Misalnya, saat kejadian La Niña, peluang peningkatan produksi bisa menjadi lebih besar, tidak hanya karena penambahan luas panen, tetapi produktivitas juga tidak mengalami penurunan bahkan meningkat karena sudah dilakukan

antisipasi penanggulangan serangan OPT yang efektif atau dengan menggunakan jenis tanaman atau varietas yang lebih tahan terhadap serangan OPT. Antisipasi untuk menanggulangi kelebihan air di saat kejadian La Niña juga perlu terus ditingkatkan dengan melakukan perbaikan atau pembangunan infrastruktur untuk mengalirkan dan menampung kelebihan air dan menekan terjadinya degradasi lahan sehingga daya serap dan kemampuan menyimpan air menjadi lebih tinggi. Kemampuan untuk beradaptasi terhadap kekurangan air juga perlu terus ditingkatkan. Konsep panen dan hemat air merupakan pendekatan yang sesuai dalam melakukan antisipasi, yaitu memanen air ketika berlebih dan menampungnya untuk digunakan dengan efisien ketika terjadi kekurangan air. Dengan demikian, diharapkan dampak negatif kejadian iklim ekstrem, seperti El Niño atau La Niña, bisa berkurang karena berbagai antisipasi telah dilakukan dan bahkan bisa diambil manfaatnya untuk meningkatkan produksi dan ketahanan pangan.

Tabel 2.4 Dampak Positif Perubahan Iklim terhadap Sektor Pertanian

Lokasi	Tanaman	Indikator PI	Dampak Positif	Pustaka
Amerika	Gandum, jagung, kedelai	Peningkatan konsentrasi CO_2	Percentase hasil meningkat; gandum (2%–20%), jagung (15%–20%), kedelai (15%–40%)	IPCC (1996)
Mexico	Jagung	Peningkatan konsentrasi CO_2	Percentase hasil meningkat 6%–61%	IPCC (1996)
India	Gandum, padi	Konsentrasi CO_2 dua kali lipat	Meningkatkan hasil gandum 28% dan padi 15%	Lal et al. (1998)
India	Padi, gandum	Konsentrasi CO_2 dua kali lipat dan penjadwalan irigasi	Peningkatan hasil padi 21% dan gandum 4%	Lal, et al. (1998)

Lokasi	Tanaman	Indikator PI	Dampak Positif	Pustaka
Nepal	Padi	Peningkatan konsentrasi CO_2 dan temperatur	Hasil panen padi meningkat antara 17%–27%	Agri Environment Unit Annual Report (2001)
Jepang	Padi	Peningkatan konsentrasi CO_2	Produksi meninggimbangi dampak negatif iklim	Aydinalp dan Cresser (2008)
Nepal	Padi dan gandum	Konsentrasi CO_2 dua kali lipat dan peningkatan temperatur	Meningkat masing-masing sebesar 26,6% dan 18,4% (CO_2); 17,1% dan 8,6% (Temperatur)	Mala (2008)
Indonesia	Padi, jagung, kedelai, ubi kayu	Curah hujan ekstrem Tinggi (La Niña)	Luas Panen meningkat: Padi 2,43% Jagung 3,55% Kedelai 5,07% Ubi Kayu 2,66%	Irawan (2013)
Indonesia	Padi, jagung, kedelai, ubi kayu	Curah hujan ekstrem Tinggi (La Niña)	Produksi meningkat Padi 1,78% Jagung 3,14% Kedelai 4,29% Ubi Kayu 2,59%	Irawan (2013)
Indonesia	Padi rawa	El Niño	Penambahan luas tanam 237,7 ribu Ha	Purba (2015)
Indonesia	Padi rawa	El Niño	Luas tanam meningkat 11,06% Luas panen meningkat 13,20% Peningkatan produksi padi sebesar 12,49% dibandingkan tahun normal	Hairani et al. (2024)

Buku ini tidak diperjualbelikan.

E. Peran Strategis Adaptasi dalam Menjamin Ketahanan Pangan

Untuk sektor pertanian, adaptasi merupakan prioritas dalam rangka antisipasi dan menekan risiko akibat dampak perubahan iklim dengan *co-benefit* mitigasi. Hal ini sesuai dengan kebijakan pengurangan dampak perubahan iklim di sektor pertanian yang menegaskan bahwa adaptasi merupakan langkah yang diperlukan untuk melindungi dan menjaga pencapaian, pelestarian, dan keberlanjutan ketahanan pangan sebagai fokus utama dalam pembangunan pertanian. Sektor pertanian perlu beradaptasi karena sektor pertanian sangat rentan terhadap perubahan iklim dibandingkan sektor lainnya. Adaptasi dengan pendekatan *co-benefit* mitigasi diharapkan dapat memberikan manfaat bagi kesejahteraan petani dan harus disesuaikan dengan sistem usaha pertanian rakyat serta menerapkan teknologi yang sesuai dan spesifik lokasi dengan melibatkan kearifan lokal.

Hasil proyeksi iklim menunjukkan bahwa dalam jangka waktu 50 tahun ke depan, suhu udara diproyeksikan meningkat dan curah hujan diproyeksikan mengalami peningkatan dan penurunan. Sebagai sektor yang sangat rentan dan memiliki tanggung jawab dalam penyediaan dan keberlanjutan pangan, adaptasi memegang peranan strategis bagi sektor pertanian demi terjaminnya ketahanan pangan. Beradaptasi merupakan suatu pendekatan untuk mengurangi kerugian akibat dampak negatif perubahan iklim atau kejadian iklim ekstrem. Hasil penelitian di sub-Sahara Afrika menunjukkan bahwa hilangnya hasil panen paling rendah terjadi ketika para petani telah mengadopsi sistem tanam berurutan dan menyesuaikan waktu tanam dengan kondisi iklim (Verchot et al., 2007). Hasil kajian di Indonesia (Tabel 2.5) menunjukkan bahwa dengan menerapkan teknologi adaptasi terbukti dapat memberi manfaat positif berupa perbaikan varietas, serta peningkatan dalam berbagai aspek, yaitu produksi, efisiensi penggunaan air, pori tersedia, kemampuan tanah memegang air, keuntungan usaha tani atau pendapatan, ketersediaan air, penurunan emisi GRK, dan penurunan biaya yang semuanya memberikan nilai

tambah untuk meraih sisi positif dampak perubahan iklim guna mendukung ketahanan pangan.

Tabel 2.5 Dampak Positif Tindakan Adaptasi pada Kondisi Iklim Ekstrem Mendukung Ketahanan Pangan

Lokasi	Upaya Adaptasi	Dampak Positif	Pustaka
Indonesia	DAM parit sebagai sumber air irigasi supplemen	Meningkatkan keterse- diaan air dan produksi pipilan jagung sebesar 65%	Gatot et al. (2001).
Indonesia	Penggunaan varietas padi adaptif	Lebih Genjah dan tahan kekeringan	Munarso (2010).
Indonesia	Penggunaan mulsa	Peningkatan produksi cabai 9%–18%	Haryati et al. (2010).
Indonesia	Teknik irigasi bawah permukaan	Meningkatkan efisiensi penggunaan air 7%–30% dibandingkan irigasi gelontor, curah dan tetes	Haryati et al. (2010).
Indonesia	Penggunaan biochar	Meningkatkan pori air tersedia 11%–37%	Nurida & Rachman (2012).
Indonesia	Penggunaan biochar	Meningkatkan pori air tersedia	Dariah et al. (2013).
USA	Penggunaan biochar	Meningkatkan kemampuan tanah memegang air 47%–61%	Yu & Sam (2013).

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Lokasi	Upaya Adaptasi	Dampak Positif	Pustaka
Tiongkok	Penerapan adaptasi	Meningkatkan produksi jagung, gandum dan beras 2,2%	Yang et al. (2015).
Indonesia	Implementasi teknologi Jajar Legowo (Jarwo) dengan varietas Ciherang, Inpari 32, Inpari 33	Meningkatkan keuntungan usaha tani 141,8% dari semua varietas	Kementerian Pertanian (2016).
Indonesia (Kabupaten Serdang Bedagai, Langkat, dan Jember)	CSA dengan tema The Better Rice Initiative Asia (BRIA) dengan teknologi yang diterapkan, antara lain: (1) teknologi pengolahan benih (menggunakan varietas unggul baru (VUB), (2) teknologi jarak tanam – Jajar Legowo (menggunakan mesin tanam), (3) pengelolaan tanah dan unsur hara berdasarkan alat uji tanah, dan (4) pengendalian hama terpadu (IPM).	Peningkatan hasil panen 13%, penerusan biaya 10%, dan peningkatan pendapatan 18%	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (2017a).

Buku ini tidak diperjualbelikan.

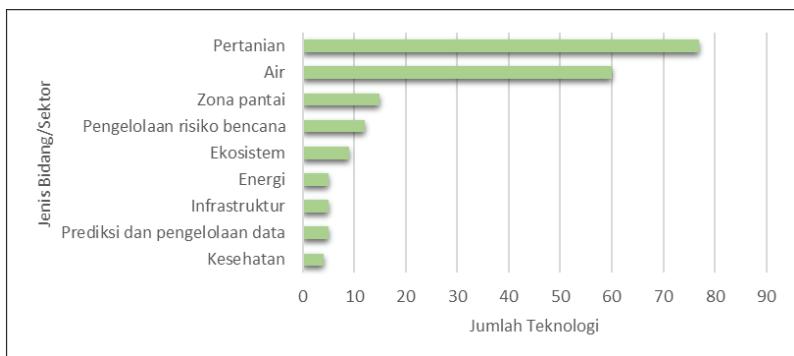
Lokasi	Upaya Adaptasi	Dampak Positif	Pustaka
Indonesia (Kabupaten Banjarnegara, Purbalingga dan Banyumas)	Pertanian Cerdas Iklim (<i>Climate Smart Agriculture/ CSA</i>) dengan tema Green Economy and Locally-Appropriate Mitigation Actions in Indonesia (GE-LAMA-I), dengan teknologi CSA yang diterapkan, yaitu: (1) perencanaan tanaman (pemanfaatan kalender tanaman dengan informasi iklim terkini); (2) penggunaan varietas unggul dan tahan iklim; (3) pengelolaan mutu benih sebelum tanam; (4) Teknologi Jajar Legowo (jarak baris); (5) teknologi hemat air (kajian lokal); (6) pengelolaan hama terpadu (PHT) (penggunaan biopestisida, penanaman tanaman penghalang hama, pengurangan penggunaan pestisida dan musuh alami; dan (7) pengelolaan unsur hara spesifik lokasi (PUTS).	Peningkatan hasil panen 14%–42%, peningkatan pendapatan 44%–141%, penurunan emisi GRK 7%–22%, dan pemanfaatan penggunaan air 10%–15%	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH. (2017b).

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Lokasi	Upaya Adaptasi	Dampak Positif	Pustaka
Indonesia	Kalender Tanam (KATAM)	Petani yang menerapkan KATAM dapat mengurangi potensi dampak negatif anomali iklim hingga 80% lebih tinggi dibandingkan mereka yang tidak menerapkan KATAM.	Perdinan (2018b).
Indonesia	Sekolah Lapang Iklim (SLI) (BMKG)	Peningkatan hasil padi hingga 30%.	Perdinan (2018b).

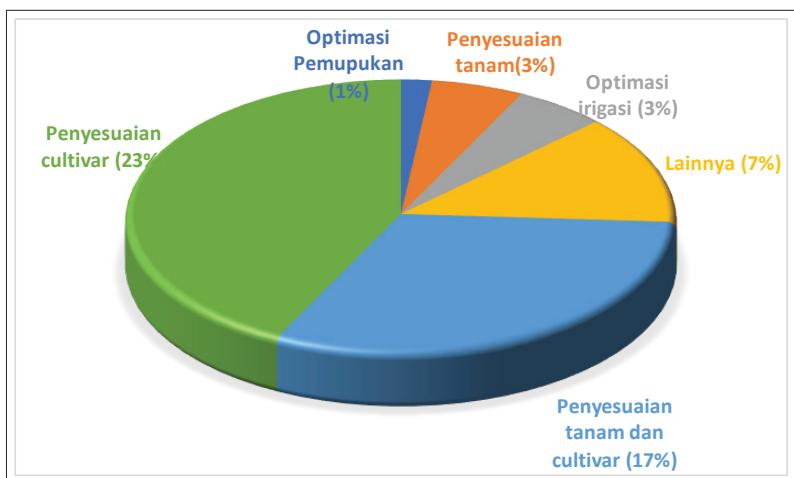
Persepsi petani terhadap ancaman dan tingkat keparahan perubahan iklim merupakan motivasi paling penting dalam melakukan adaptasi secara sukarela, tetapi sangat tergantung pada ketersediaan informasi yang terkait (Semenza et al., 2011). Sebagai sektor yang paling rentan, pertanian membutuhkan teknologi yang lebih banyak dan beragam untuk beradaptasi terhadap perubahan iklim. Pentingnya adaptasi di sektor pertanian juga ditunjukkan oleh jumlah teknologi yang diperlukan. Hasil kajian UNEP (2014) memperlihatkan dari 192 teknologi prioritas adaptasi yang diidentifikasi berdasarkan 25 laporan *technology needs assesment* (TNA), 80 di antaranya adalah dari sektor pertanian, berikutnya sektor air, dan seterusnya (Gambar 2.10). Adopsi teknologi ini terbukti memberikan manfaat bagi sektor pertanian. Penyesuaian varietas mampu memberikan manfaat paling tinggi (23%), dilanjutkan dengan penyesuaian waktu tanam dan varietas (17%) (Gambar 2.11). Berdasarkan distribusinya, teknologi adaptasi yang paling banyak diperlukan di sektor pertanian adalah diversifikasi tanaman dan varietas (15%), berikutnya teknologi pemberian air irigasi melalui *sprinkler* dan *drip* (11%) (Gambar 2.12).

Buku ini tidak diperjualbelikan.



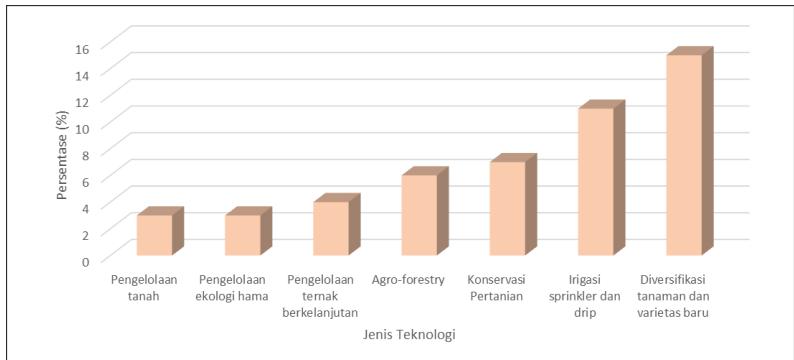
Sumber: Dimodifikasi dari UNEP (2014)

Gambar 2.10 Distribusi Sektor pada 192 Teknologi Adaptasi Prioritas yang Diidentifikasi dalam 25 Laporan TNA



Sumber: Dimodifikasi dari UNEP (2014)

Gambar 2.11 Manfaat Implementasi Teknologi Adaptasi di Sektor Pertanian



Sumber: Dimodifikasi dari UNEP (2014)

Gambar 2.12 Persentase Prioritas Teknologi Adaptasi yang Diperlukan di Sektor Pertanian

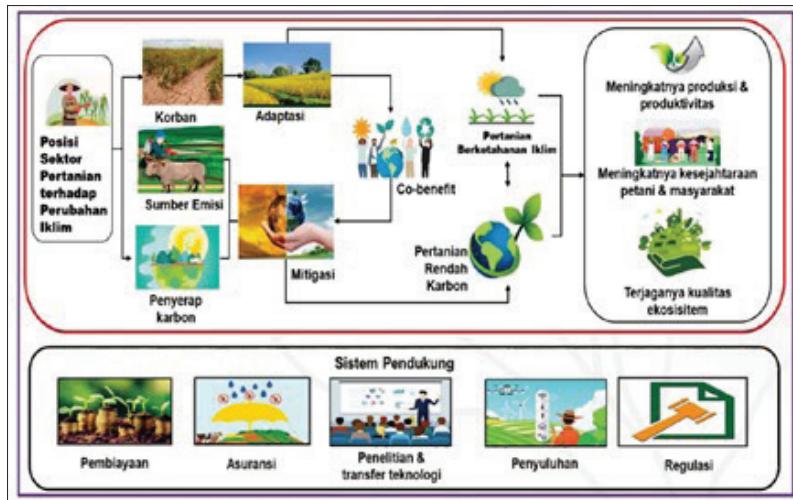
Strategi adaptasi perubahan iklim di Indonesia dimaksudkan untuk mengurangi risiko di semua sektor pembangunan, termasuk pertanian. Pencapaian tujuan ini dapat dilakukan melalui penguatan kemampuan lokal, pengurangan risiko bencana, pengembangan kebijakan yang menyeluruh dan peningkatan manajemen pengetahuan, serta penerapan teknologi adaptif (NDC, 2016).

Menurut Pawitan et al. (2003), untuk menjaga keberlanjutan sistem produksi serta mengurangi dampak negatif perubahan iklim terhadap sektor pertanian di Indonesia, upaya yang perlu dilakukan ialah (1) meningkatkan ketahanan sektor pertanian terhadap banjir dan kekeringan, (2) meningkatkan keakuratan pemantauan dan prediksi cuaca dan iklim serta distribusinya, (3) memantau perubahan penggunaan lahan yang berdampak pada perubahan iklim, (4) melakukan sosialisasi tentang berbagai aspek yang terkait dengan adaptasi perubahan iklim, dan (5) mengintegrasikan program dan aksi adaptasi dalam menghadapi perubahan iklim.

Teknologi adaptasi telah banyak tersedia dan terbukti memberi nilai tambah bagi sektor pertanian, tetapi dalam implementasinya perlu strategi adaptasi agar sesuai dengan perencanaan untuk mendukung ketahanan pangan. Peran strategis adaptasi dalam menjamin

ketahanan pangan dapat diwujudkan dengan mengimplementasikan Pembangunan Berketahanan Iklim (PBI) dan Pembangunan Rendah Karbon (PRK). Ketahanan iklim melibatkan tindakan yang direncanakan atau spontan untuk mengurangi dampak negatif yang dapat timbul dari ancaman, kerentanan, dan risiko perubahan iklim terhadap masyarakat di wilayah yang terkena dampak. Tujuan utamanya adalah mengurangi potensi kerugian yang terjadi. Pembangunan berkelanjutan yang berfokus pada ketahanan iklim dilakukan dengan tujuan mencapai keseimbangan antara aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan (Kementerian PPN/Bappenas, 2021).

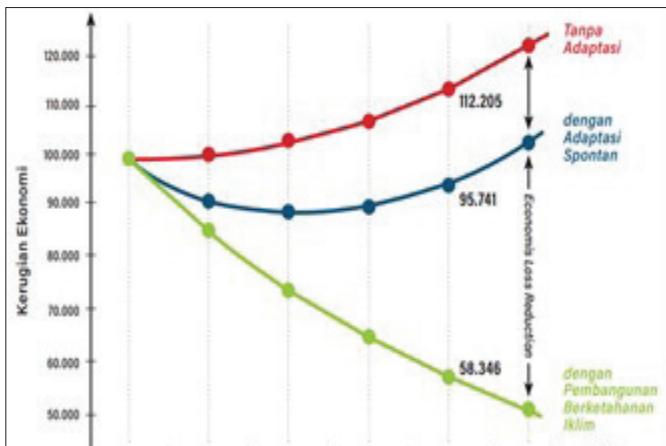
Untuk sektor pertanian, PBI dilakukan dengan pendekatan bahwa pertanian memiliki tiga posisi terhadap perubahan iklim, yaitu sebagai korban, sumber emisi, dan penyerap karbon. Adaptasi menjadi aksi yang harus dilakukan untuk menekan dampak dengan *co-benefit* mitigasi untuk mengurangi emisi dan meningkatkan serapan karbon. Implementasi PBI dan PRK menjadi pendekatan untuk pencapaian pembangunan di sektor pertanian dengan target utama peningkatan produksi dan produktivitas, kesejahteraan petani, dan tetap menjaga kualitas lingkungan. Dukungan pembiayaan, asuransi, riset, penyuluhan dan pendampingan, serta regulasi diperlukan dalam mempercepat tercapainya target tersebut (Gambar 2.13). Penerapan tindakan adaptasi di sektor pertanian telah dilakukan di lapangan, tetapi perlu ditingkatkan untuk memastikan implementasinya yang lebih efektif untuk meningkatkan ketangguhan sistem pertanian dan ketahanan pangan di Indonesia.



Sumber: Hermanto et al. (2022)

Gambar 2.13 Kerangka Pikir PBI dan PRK di Sektor Pertanian untuk Mendukung Ketahanan Pangan

Penerapan PBI dalam konteks ketahanan pangan dilakukan dengan mengimplementasikan teknologi sebagai upaya adaptasi untuk mengurangi dampak negatif dari kejadian iklim ekstrem. Selain itu, peran penting adaptasi dan implementasi PBI sangat signifikan dalam mengurangi kerugian ekonomi akibat perubahan iklim. Berdasarkan studi Kementerian PPN/Bappenas (2021), diperkirakan dampak perubahan iklim dapat menyebabkan kerugian ekonomi sebesar 112,2 triliun rupiah. Namun, dengan adanya tindakan adaptasi spontan melalui program adaptasi sektoral, kerugian tersebut dapat dikurangi menjadi sekitar 95,7 triliun rupiah atau terjadi penurunan sebesar 15%. Selain itu, melalui implementasi Pembangunan Ketahanan Iklim yang terencana, diharapkan kerugian yang dialami dapat ditekan hingga sekitar 58,3 triliun rupiah atau penurunan hampir 50% (Gambar 2.14).



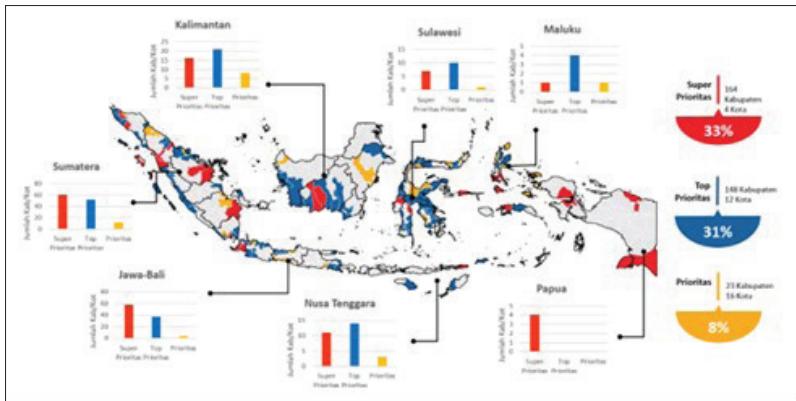
Sumber: Kementerian PPN/Bappenas (2021)

Gambar 2.14 Peran Adaptasi dan PBI dalam Menekan Kerugian Ekonomi

Implementasi PBI perlu didukung dengan data dan informasi lokasi adaptasi berdasarkan tingkat kerentanannya karena dampak perubahan iklim spesifik di setiap lokasi (Estiningtyas et al., 2021a). Kajian Kementerian PPN/Bappenas (2021) menghasilkan lokasi prioritas ketahanan iklim Sektor Pertanian. Lokasi dibagi berdasarkan prioritas, top prioritas, dan super prioritas. Prioritas berdasarkan potensi bahaya tinggi, top prioritas berdasarkan potensi bahaya tinggi + kerentanan tinggi/indeks risiko bencana iklim, sedangkan super prioritas berdasarkan potensi bahaya tinggi + kerentanan tinggi + indeks risiko bencana iklim (Gambar 2.15). Sebaran lokasi ini sangat membantu dalam menetapkan lokasi aksi adaptasi untuk meminimalikan dampak dan mendukung ketahanan pangan.

Aksi adaptasi perubahan iklim dilakukan berdasarkan gejala perubahan iklim yang ditimbulkan serta dampaknya terhadap pertanian. Oleh karena itu, penting untuk melakukan monitoring terhadap perkembangan indeks global termasuk El Niño dan La Niña di lokasi kunci (*key area*). *Key area* ini merupakan lokasi di mana curah hujan di lokasi tersebut berkorelasi kuat dan signifikan terhadap indeks

global, seperti suhu muka laut di Nino 3.4 (Estiningtyas et al., 2021b). Data informasi tentang prediksi dan proyeksi iklim telah tersedia di berbagai sumber, seperti <https://www.bmkg.go.id/> untuk mengetahui prediksi iklim dasarian dan bulanan di Indonesia, termasuk kapan awal musim hujan dan musim kemarau serta informasi lainnya. Untuk mengetahui perkembangan indeks ENSO bisa diakses melalui situs web https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current/?enso_tab=enso-cpc_plume).



Sumber: Kementerian PPN/Bappenas (2021)

Gambar 2.15 Sebaran Lokasi Prioritas Kegiatan Ketahanan Iklim Sektor Pertanian

Implementasi dari hasil kajian ini dapat dijelaskan dari dua aspek. *Pertama*, meminimalkan dampak negatif melalui monitoring kejadian iklim ekstrem. Telah diketahui bahwa dampak perubahan iklim maupun kejadian iklim ekstrem yang telah teridentifikasi bersifat spesifik lokasi. Selanjutnya, perlu dilakukan pemantauan terhadap perkembangan indeks global terkait curah hujan, suhu, serta El Niño dan La Niña mengingat dampaknya yang signifikan terhadap pertanian. Apabila diketahui dari hasil pemantauan bahwa akan terjadi El Niño atau La Niña, dalam rentang waktu yang masih memungkinkan (minimal 1 musim) dapat dilakukan perencanaan dan strategi antisipasinya. Sebagai contoh, jika berdasarkan pemantauan

diperkirakan akan terjadi El Niño, upaya yang dilakukan, antara lain penggunaan varietas yang adaptif terhadap kondisi kekeringan, efisiensi penggunaan air, pompanisasi untuk akses air, pengaturan drainase, penggunaan biochar yang mampu menyerap air agar hemat, melakukan sistem tanam sesuai kondisi setempat (misal sistem culik, seperti di Kabupaten Indramayu), dan lain-lain. Sementara itu, jika hasil monitoring menunjukkan akan terjadi La Niña, upaya yang dapat dilakukan, yaitu penggunaan varietas tahan genangan, panen dan konservasi air, pompanisasi untuk pembuangan genangan air di lahan, perbaikan drainase, dan lain-lain. Upaya antisipasi ini perlu diperkuat dengan melakukan sosialisasi, bimbingan teknis, serta pendampingan secara berjenjang hingga ke tingkat petani. *Kedua*, meraih manfaat dari perubahan iklim dan iklim ekstrem. Iklim ekstrem La Niña dapat menambah luas tanam pada MK kedua pada lahan yang biasanya tidak tersedia air atau air terbatas dengan melakukan percepatan tanam. Sementara itu, pada saat El Niño, luas tanam dapat ditambah, khususnya dari lahan rawa lebak yang tadinya tergenang menjadi surut sehingga dapat dilakukan penanaman.

Selain pendekatan tersebut, mekanisme asuransi pertanian juga merupakan opsi adaptasi terhadap perubahan iklim. Gagal panen akibat kejadian iklim ekstrem banjir, kekeringan, dan serangan OPT dapat diminimalkan risikonya melalui mekanisme asuransi pertanian. Berbagai metode dalam penentuan klaim asuransi sudah dikembangkan, seperti Asuransi Indeks Iklim (*Weather Index Insurance*, WII) (Estiningtyas et al., 2023). Dalam WII, yang diasuransikan bukan tanaman, melainkan indeks iklim yang dapat diwakili oleh parameter iklim, yakni curah hujan, suhu, dan lain-lain. WII berpeluang diimplementasikan di Indonesia; hal ini terlihat dari hasil survei kesediaan membayar (*willingness to pay*, WTP) oleh petani yang cukup baik (Estiningtyas et al., 2012).

F. Penutup

Prediksi dan proyeksi iklim menunjukkan bahwa suhu akan terus meningkat dan pola serta intensitas curah hujan akan mengalami

perubahan. Fenomena iklim ekstrem El Niño dan La Niña juga akan makin sering terjadi. Hal ini mengindikasikan bahwa risiko dan kerugian terhadap sektor pertanian, khususnya usaha tani pangan yang terkait erat dengan ketahanan pangan, akan terus dihadapi oleh para petani dan pelaku kegiatan pertanian.

Dampak perubahan iklim, termasuk kejadian iklim ekstrem, secara jelas dapat mengurangi ketersediaan air, merusak sumber daya lahan, dan mengakibatkan penurunan luas tanaman, yang pada akhirnya mengurangi produktivitas tanaman pangan (pajale). Tanggangan dalam meningkatkan produksi tanaman pangan akan terus ada mengingat potensi dampak perubahan iklim juga diproyeksikan terus meningkat. Hal ini akan mengganggu ketahanan pangan nasional.

Sisi positif dampak perubahan iklim yang selama ini belum banyak diungkap dan menjadi kebaruan dari tulisan ini menunjukkan adanya peningkatan luas panen dan produksi tanaman pangan. Pada kondisi La Niña, luas panen tanaman pangan pajale dan ubi kayu meningkat 2%–5% dan peningkatan produksi 2%–4%. Pada saat El Niño, dampak positif perubahan iklim diraih melalui penambahan luas panen sebesar 237.700 ha. Pemanfaatan lahan rawa lebak saat El Niño juga memberikan potensi kontribusi terhadap produksi beras nasional sekitar 14% atau 6–8 juta ton dengan tingkat produktivitas 4 ton/ha gabah kering giling. Potensi ini perlu terus dikaji dan dikembangkan untuk meningkatkan nilai tambah dan meraih manfaat dari dampak positif perubahan iklim.

Strategi adaptasi memegang peran penting dalam perencanaan dan implementasi aksi adaptasi dalam mendukung ketahanan pangan. Pendekatan pertanian berketeraan iklim dan rendah karbon memperkuat upaya adaptasi dengan tetap fokus pada target di sektor pertanian, yaitu peningkatan produksi dan produktivitas, kesejahteraan petani, dan tetap menjaga kualitas lingkungan. Berbagai teknologi adaptasi yang telah dihasilkan termasuk informasi iklim dalam implementasinya perlu disosialisasikan, serta dilakukan pendampingan di lapangan agar tepat sasaran. Pada gilirannya, dampak positif perubahan iklim yang didukung dengan teknologi inovasi serta

monitoring dampak merupakan potensi manfaat yang bisa diraih untuk mendukung ketahanan pangan.

Kondisi iklim penting dalam sistem produksi pertanian maka akurasi data prediksi iklim, terutama curah hujan dan suhu, akan menentukan ketepatan langkah strategi yang akan diterapkan di sektor pertanian dan menentukan tingkat ketahanan pangan nasional.

Referensi

- Abrol, D. B. (2013). *Integrated pest management: Current concepts and ecological process*. Academic Press.
- Aldrian, E. (2023, 16 Mei). Pergeseran musim akibat pemanasan global. *Republika*. <https://www.republika.id/posts/40789/pergeseran-musim-akibat-pemanasan-global>.
- Aldrian, E., & Djamil, S. D. (2006). Long term rainfall trend of the brantas catchment area, East Java. *Indonesian Journal of Geography*, 38(1), 27.
- Aldrian, E., Surmaini, E., Marwanto, S., Apriyana, Y., Maftu'ah, E., Pramudia, A., Fanggidae, Y. R., Supari, Syafrianno, A. A., Khoir, A. N., Chandrasa, G. T., Muhsaryah, R., Suradi, Perdinan, Anggraeni, L., Adi, R. F., Tjahjono, R. E. P., Infrawan, D. Y. D., & Sulistyowati, D. (2022). *Dampak perubahan iklim terhadap sektor pertanian: Fokus komoditas padi dan kopi (arabika dan robusta)* [Laporan Akhir]. PI-AREA.
- Apriyana, Y., Susanti, E., Suciantini, Ramadhani, F. & Surmaini, E. (2016). *Analisis dampak perubahan iklim terhadap produksi tanaman pangan pada lahan kering dan rancang bangun sistem informasinya, Analysis of climate change impacts on food crops production in dry land and design of information system*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Arif, A. (2023, 10 Mei). Prediksi El Niño dan karhutla di Indonesia. *Kompas*. <https://www.kompas.id/baca/humaniora/2023/05/08/prediksi-El-Niño-dan-karhutla-di-indonesia-pada-2023>.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2023). *Data bencana Indonesia*. Geoportal Data Bencana Indonesia. Diakses pada 25 Mei, 2023, dari <https://dibi.bnrb.go.id/>.
- Badan Pusat Statistik. (2023). *Jumlah penduduk pertengahan tahun (ribu jiwa), 2020–2022*. <https://www.bps.go.id/indicator/12/1975/1/jumlah-penduduk-pertengahan-tahun.html>

- Barani, A. M., Dariah, A., Suryotomo, A. P., Mulyani, A., Apriyanto, A., Hidayat, A., Sumawinata B., Kartiwa, B., Taniwiryo, D., Sadono, D., Fahamsaya, E., Widiastuti, H., Hermantoro, Palunggono, H. B., Ismail, I., Safitri, L., Tambusai, M.N., Ernawan, R., Sapto, S. K., Siswanto, Sabiham, S., Suratman, Anwar, S., & Adhi. Y. A. (2021). *Gambut, sawit, dan lingkungan* (S. Sabiham, A. Dariah, Hermantoro, & I. Ismail, Ed.). IPB PRESS.
- Boer, R. (2011, 9–10 November). *Ancaman perubahan iklim terhadap ketahanan pangan* [Presentasi makalah]. Workshop Nasional dan FGD: Adapatisasi Perubahan Iklim. Balai Besar Sumber Daya Lahan Pertanian, Kementerian Pertanian, Bandung, Indonesia.
- DaMatta, F. M., Grandis, A., Arenque, B. C., & Buckeridge, M. S. (2010). Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. *Food Research International*, 43(7), 1814–1823.
- Dariah, A., Nurida, N. L., Yustika, R. D., & Suryani, E. (2022). Annual upland agriculture as a vulnerable system to climate change. Dalam *Strengthening agricultural resilience against climate change through climate smart agriculture* (49–62). Indonesian Agency for Agricultural Research and Development (IAARD). https://www.researchgate.net/publication/361809945_Annual_Upland_Agriculture_as_a_Vulnerable_System_to_Climate_Change
- Dariah, A., Nurida, N. L., & Sutono. (2013). The effect of biochar on soil quality and maize production in upland in dry climate region. Dalam *Proceeding 11th international conference the East and Southeast Asia federation of Soil Science Societies*.
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH. (2017a). *Better rice initiative Asia*. Diakses dari <https://www.giz.de/en/worldwide/57047.html>
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH. (2017b). *Paket teknologi CSA di Jawa Tengah Kabupaten Purbalingga & Banyumas*. Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.
- Direktorat Jenderal Sumber Daya Air. (2015). *Irigasi faktor utama peningkatan pangan nasional*. Diakses dari https://sda.pu.go.id/berita/view/irigasi_faktor_utama_peningkatan_pangan_nasional.
- Estiningtyas, W., Boer, R., Las, I., & Buono, A. (2012). Analisis usahatani padi untuk mendukung pengembangan asuransi indeks iklim (Weather index insurance): Studi kasus di Kabupaten Indramayu. *Jurnal Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian*, 15(2), 158–170.

- Estiningtyas, W., Kartikasari, K., Perdinan, & Dermoredjo, S. K. (2022, November). Index-based insurance for climate risk management in Indonesia Agriculture. Dalam *International conference on radioscience, equatorial atmospheric science and environment* (621–629). Springer.
- Estiningtyas, W., Mulyani, A., & Kartiwa, B. (2021a, Februari). Assessing the vulnerability of food farming system to support climate change adaptation: A case study in Java, Indonesia. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 648, No. 1, Artikel 012093). IOP Publishing..
- Estiningtyas, W., Surmaini, E., Suciantini, N., Susanti, E., Mulyani, A., Kartiwa, B., Sumaryanto, N., Perdinan, N., Apriyana, Y., & Alifia, A. D. (2024). Analysing food farming vulnerability in Kalimantan, Indonesia: Determinant factors and adaptation measures. *PLoS One*, 19(1), Artikel e0296262. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296262>.
- Estiningtyas, W., Syahbuddin, H., Harmanto, Sumaryanto, Mulyani, A., Setyorini, D., Kartiwa, B., Susanti, E., Surmaini, E., Sujono, R., Haryono, Rakhman, A., Suciantini, Apriyana, Y., Pramudia, A., Sarvina, Y., Nengsusmoyo, C., Kurniawan, H., Nugroho, A. A., ..., A. S. Hutami. (2016). *Analisis dan pemetaan tingkat kerentanan usaha tani pangan dan risiko iklim* [Laporan akhir]. Kementerian Pertanian.
- Estiningtyas, W., Syahbuddin, H., Pramudia, A., & Dermoredjo, S. K. (2021b, April). Analysis of key locations as indicators for extreme climate impacts in supporting climate change adaptation in Indonesia. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 724, No. 1, Artikel 012042). IOP Publishing.
- Food and Agriculture Organization. (1996, 13–17 November). *Rome Declaration on World Food Security and World Food Summit Plan of Action*. World Food Summit, Rome.
- Gatot, I. S., Duchesne, J., Forest, F., Perez, P., Cudennec, C., Prasetyo, T., & Karama, S. (1999, Mei). Rainfall-runoff harvesting for controlling erosion and sustaining upland agriculture development. Dalam *Sustaining the global farm: Selected papers from the 10th international soil conservation organization meeting held* (Vol. 24, 29).
- Hairani, A., Noor, M., Alwi, M., Saleh, M., Rina, Y., Khairullah, I., Sosiawan, H., Heryani, N., Mukhlis, M., & Lenin, I. (2024). Freshwater swampland as food buffer during El Niño: Case study in South Kalimantan, Indonesia. *Chilean journal of agricultural research*, 84(1), 132–143.

- Haryati, U., Abdurachman, A., & Subagyono, K. (2010). Efisiensi penggunaan air berbagai teknik irigasi untuk pertanaman cabai di lahan kering pada Typic Kanhapludutls Lampung. Dalam *Prosiding semnas sumber daya lahan pertanian* (25–45). BBSDLP.
- Hermanto, F., Agus, T., Alihamsyah, Surmaini, E., Dariah, A., Estiningtyas, W., Susilawati, H. L., Heryani, N., Susanti, E., Tiesnamurti, B., Ikhsan, M., Zuziana, Chaidirsyah, R. M., Waryanto, B., Adhie, S., Senoadji, T., & Salampessy, Y. N. (2022). *Grand design pembangunan berkelanjutan iklim dan rendah karbon di sektor pertanian*. Kementerian Pertanian.
- Hoogenboom, G. (2000). Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. *Agricultural and forest meteorology*, 103(1-2), 137–157.
- Hosang, P. R., Tatuh, J., & Rogi, J. E. (2012). Analisis dampak perubahan iklim terhadap produksi beras Provinsi Sulawesi Utara tahun 2013–2030. *Jurnal Eugenia*, 18(3).
- Irawan, B. (2006). Fenomena anomali iklim El Niño dan La Niña: Kecenderungan jangka panjang dan pengaruhnya terhadap produksi pangan. *Forum Penelitian Agro Ekonomi*, 24(1), 28–45.
- Irawan, B. (2013). *Dampak El Niño dan La Niña terhadap produksi padi dan palawija*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2020). *Peta jalan Nationally Determined Contribution (NDC) aspek adaptasi*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Kementerian Pertanian. (2016). *Petunjuk teknis budidaya padi jajar Legowo Super* (58).
- Kementerian PPN/Bappenas. (2021). Kebijakan pembangunan berkelanjutan iklim (*Climate resilient development policy 2020–2045*) [Ringkasan eksekutif]. Bappenas.
- Lal, M., Singh, K. K., Rathore, L. S., Srinivasan, G., & Saseendran, S. A. (1998). Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate. *Agricultural and forest meteorology*, 89(2), 101–114.
- Lutz, F. (2014). *Exploring the potential of soil and water conservation as an adaptation strategy to climate change*.

- Maxwell, S., & Smith, M. (1992). Household food security: a conceptual review. *Household food security: Concepts, indicators, measurements*, 1, 1–72.
- Motha, R. P., & Baier, W. (2005). Impacts of present and future climate change and climate variability on agriculture in the temperate regions: North America. *Climatic Change*, 70(1–2), 137–164.
- Munarso, Y. P. (2010). Sifat kegenjahan dan toleran kekeringan beberapa galur padi sebagai calon tetua. *Agrovigor: Jurnal Agroekoteknologi*, 3(2), 125–130.
- Naylor, R. L., Battisti, D. S., Vimont, D. J., Falcon, W. P., & Burke, M. B. (2007). Assessing risks of climate variability and climate change for Indonesian rice agriculture. *Proceeding of the National Academic of Science*, 104(19), 7752–7757.
- NDC. (2016). *First nationally determined contribution Republic of Indonesia*. https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/First%20NDC%20Indonesia_submitted%20to%20UNFCCC%20Set_November%20%202016.pdf
- Nurida, N. L., & Rachman, A. (2012, Juni). Alternatif pemulihan lahan kering masam terdegradasi dengan formula pembenah tanah biochar di Typic Kanhapludults Lampung. Dalam I. G. P. Wigena, N. L. Nurida, D. Setyorini, E. Husen, & E. Suryani (Ed.), Prosiding seminar nasional teknologi pemupukan dan pemulihan lahan terdegradasi (639–648). Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Pawitan, H., Kartiwa B., Amien I., Sosiawan H., Surmaini E., & A. Hamdani. (2010). *Analisis dampak perubahan iklim terhadap dinamika potensi sumberdaya air untuk pertanian: Konsorsium penelitian dan pengembangan perubahan iklim untuk mengurangi akibat dan resiko iklim pada sektor pertanian (KP3I)*. Badan Litbang Pertanian.
- Pawitan, H., Redjekiningrum, P., Kartiwa, B., Sosiawan, H., & Rahayu, B. (2011). *Analisis dampak perubahan iklim terhadap dinamika potensi sumberdaya air untuk pertanian: Konsorsium penelitian dan pengembangan perubahan iklim untuk mengurangi akibat dan resiko iklim pada sektor pertanian (KP3I)*. Badan Litbang Pertanian.
- Perdinan, Kartikasari, K., & Malahayati, M. (2014). *Climate resilience in rice and other crops national studies: Indonesia*. CCROM.

- Perdinan, P., Atmaja, T., Adi, R. F., & Estiningtyas, W. (2018a). Adaptasi perubahan iklim dan ketahanan pangan: Telaah inisiatif dan kebijakan. *Jurnal Hukum Lingkungan Indonesia*, 5(1), 60–87.
- Perdinan. (2018b). *Future of Food. Journal on Food, Agriculture and Society. Research Paper*.
- Perdinan. (2019). *Pandangan terhadap perubahan iklim di Indonesia* [Presentasi makalah]. Kerja sama KLHK dan GIZ.
- Purba, G. N. (2015, 23 September). Pemanfaatan rawa lebak solusi tingkatkan produktivitas padi saat El Niño. *medcom.id*. <https://www.medcom.id/ekonomi/mikro/8N0gJqYK-pemanfaatan-rawa-lebak-solusi-tingkatkan-produktivitas-padi-saat-El Niño#:~:text=Dirinya%20menambahkan%2C%20total%20luas%20lahan,bertambah%20sekitar%2037%2C7%20ha>.
- Rejekiningrum, P. (2014). Dampak perubahan iklim terhadap sumberdaya air: Identifikasi, simulasi dan rencana aksi. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 8(1), 1–15.
- Reuter, T. & A. Dariah. (2019). Pertanian, ketahanan pangan, dan perubahan iklim. Dalam Siti Nurbaya (Ed.), *Trilogi Indonesia menghadapi perubahan iklim* (32–42). Penerbit Buku Kompas.
- Ridwan, M., & Hendri. (2001, 1 November). *Rancangan peraturan pemerintah (RPP) tentang perubahan iklim* [Makalah]. Seminar Climate Change Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia.
- Sahardjo, B. H. (2000). *Evaluasi kerusakan lingkungan akibat kebakaran hutan dan lahan*. Institut Pertanian Bogor.
- Schindele, W. W. Thoma, W., & Panzer, K. (1989). *the Forest Fire 1983/1988 in East Kalimantan, Part I. The Fire, The Effect, The Damage and Technical Solutions*. Investigation of the step needed to Rehabiliate the Area of East Kalimantan Seriously Affected by Fire. FR-Project ITTO, GTZ, BPPK, and DES.
- Schulze, R. E. (2000). Modelling hydrological responses to land use and climate change: A southern African perspective. *Ambio*, 12–22.
- Semenza, J. C., Ploubidis, G. B., & George, L. A. (2011). Climate change and climate variability: Personal motivation for adaptation and mitigation. *Environmental Health*, 10, 1–12.
- Sjarmidi, A., & Aryantha, N. P. (1997). *Komunitas mikroba pasca kebakaran hutan*. LIPI.

- Suharyanto, H. (2011). Ketahanan pangan. *Jurnal Sosial Humaniora (JSH)*, 4(2), 186–194.
- Surmaini, E., Sarvina, Y., Susanti, E., Widiarta, I. N., Misnawati, M., Suciantini, S., Fanggidae, Y. R., Rahmini, R., & Dewi, E. R. (2024). Climate change and the future distribution of Brown Planthopper in Indonesia: A projection study. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences (Online)*, 23(2), 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2023.10.002>
- Susandi, A. (2006). Bencana perubahan iklim global dan proyeksi perubahan iklim Indonesia. *Kelompok Keahlian Sains Atmosfer Fakultas Ilmu Kebumian dan Teknologi Mineral ITB: Bandung*.
- Susanti, E., Dewi, E. R., Surmaini, E., Sopaheluwakan, A., Linarko, A., & Syahputra, M. R. (2021). The projection of rice production in Java Island to support Indonesia as the world food granary. *E3S Web of Conferences*, 306, 01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130601011>
- Susanti, E., Surmaini, E., & Estiningtyas, W. (2018). Parameter iklim sebagai indikator peringatan dini serangan hama penyakit tanaman. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 12(1), 59–70.
- Susilawati, A., & Nursyamsi, D. (2014). Sistem surjan: kearifan lokal petani lahan pasang surut dalam mengantisipasi perubahan iklim. *Jurnal sumberdaya lahan*, 8(1), 3–42.
- Tubiello, F. N., Soussana, J. F., & Howden, S. M. (2007). Crop and pasture response to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19686–19690.
- United Nations Environment Programme. (2014). *The adaptation gap report*. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9331-Adaptation_gap_report_a_prel.pdf?sequence=2&isAllowed=y.
- Verchot, L. V., Van Noordwijk, M., Kandji, S., Tomich, T., Ong, C., Albrecht, A., Mackensen, J., Bantilan, C., Anupama, K. V., & Palm, C. (2007). Climate change: Linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 12, 901–918.
- Wiyono, S. (2007). *Perubahan iklim dan ledakan hama penyakit tanaman, keanekaragaman hayati di tengah perubahan iklim: Tantangan masa depan Indonesia*. KEHATI.
- World Bank. (1986). *Poverty and hunger: Issues and options for food security in developing countries*.

- Yang, X., Chen, F., Lin, X., Liu, Z., Zhang, H., Zhao, J., Li, K., Ye, Q., Li, Y., Lv, S., Yang, P., Wenbin, W., Li, Z., Lal, R., & Tang, H. (2015). Potential benefits of climate change for crop productivity in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 208, 76–84.
- Yu, O. Y., Raichle, B., & Sink, S. (2013). Impact of biochar on the water holding capacity of loamy sand soil. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4, 1–9. <http://www.journal.ijeee.com/content/4/1/44>.

Bab III

Pengaruh Kondisi Iklim terhadap Pertanian Padi dan Jagung di Nusa Tenggara Timur

Bayu Dwi Apri Nugroho

Pada Bab II telah diuraikan dampak perubahan iklim secara umum terhadap ketahanan pangan. Bab III ini akan menjelaskan secara rinci contoh kasus di Nusa Tenggara Timur, menguraikan bagaimana iklim dan cuaca ekstrem sangat memengaruhi produktivitas pertanian, serta pentingnya prediksi iklim pada masa depan dalam menentukan hasil pertanian.

A. Kondisi Iklim, Curah Hujan, serta Produktivitas Padi dan Jagung di Nusa Tenggara Timur

Indonesia termasuk negara terdampak anomali iklim global yang ditandai peningkatan $0,3^{\circ}\text{C}$ suhu udara dalam satu abad. Anomali iklim global berdampak pada penurunan 2%–3% curah hujan di

B. D. A. Nugroho

Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: bayu.tep@ugm.ac.id

© 2024 Editor & Penulis

Nugroho, B. D. A. (2024). Pengaruh kondisi iklim terhadap pertanian padi dan jagung di Nusa Tenggara Timur. Dalam D. E. Nuryanto & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (59–88).

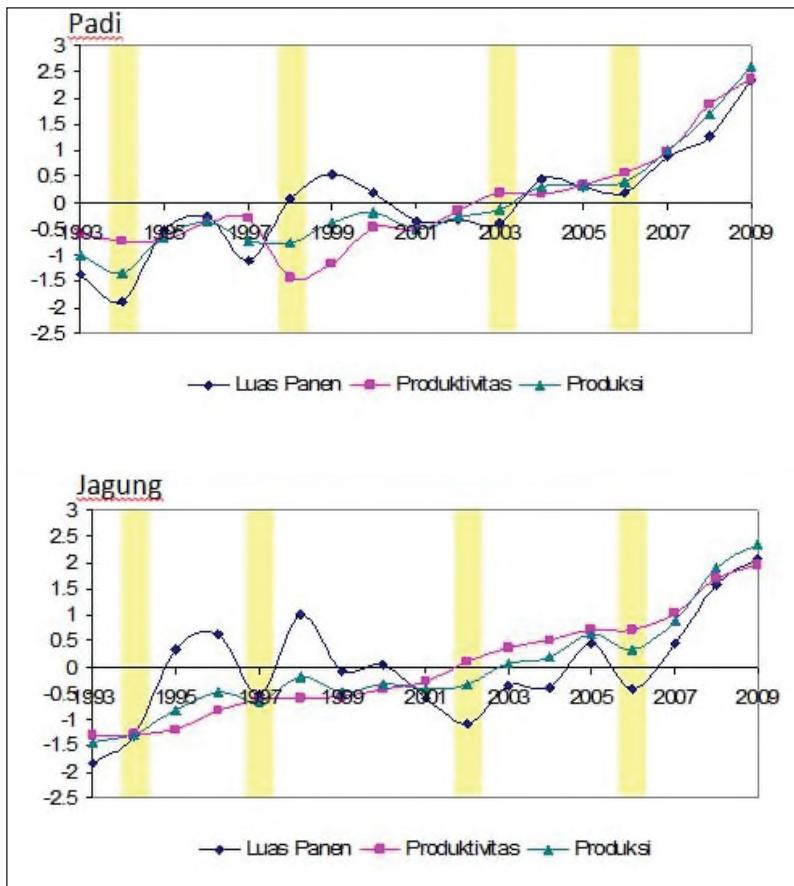
Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1244.c1387. E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

Indonesia (Hulme & Sheard, 1999). Peningkatan suhu udara diperkuat besarnya penggunaan bahan bakar fosil di Indonesia dengan menyebabkan peningkatan produksi CO₂. Di sisi lain, Indonesia merupakan negara agraris dengan sektor unggulan dan mata pencaharian utama dari sektor pertanian. Pengairan dan iklim mikro pertanian Indonesia masih tergantung dengan curah hujan sehingga anomali iklim global membawa dampak besar (Yohe & Tol, 2002). Kecenderungan besaran perubahan suhu dan curah hujan di Indonesia pada dasarnya tidak menunjukkan keseragaman di setiap daerah. Beberapa daerah justru mengalami peningkatan jumlah curah hujan tahunan. Dengan demikian, pengaruh perubahan iklim perlu ditinjau secara spesifik di daerah-daerah tertentu sehingga dapat dilakukan proses adaptasi dan mitigasinya secara efektif dan efisien. Hal ini penting untuk mendukung ketahanan pangan di daerah.

Nusa Tenggara Timur (NTT) terletak di selatan garis khatulistiwa, tepatnya pada posisi 8°–12°LS dan 118°–125°BT. Provinsi NTT di utara berbatasan langsung dengan Laut Flores, di selatan dengan Samudra Hindia, sebelah timur dengan Negara Timor Leste, dan sebelah barat berbatasan dengan Provinsi Nusa Tenggara Barat (NTB). Nusa Tenggara Timur (NTT) merupakan wilayah kepulauan yang terdiri dari 566 pulau, 432 pulau di antaranya sudah mempunyai nama dan sisanya sampai saat ini belum mempunyai nama. Nusa Tenggara Timur (NTT) memiliki berbagai macam kekayaan alam di sektor peternakan, kelautan, pariwisata, serta sektor pertanian (Kondisi geografis, 2016). Nusa Tenggara Timur (NTT) secara geografis berdekatan dengan Australia dan Samudra Pasifik sehingga curah hujan di NTT sangat dipengaruhi oleh dinamika iklim dan atmosfer yang terjadi di Australia dan Samudra Pasifik. Peristiwa ekstrem, seperti El Niño dan La Niña di Pasifik, sering kali berdampak negatif terhadap curah hujan dan produktivitas pertanian di Provinsi NTT (Karuniasa & Pambudi, 2023). Untuk meningkatkan produktivitas pertanian dan ketahanan pangan di NTT, perlu didukung oleh analisis perubahan kondisi iklim dan lingkungannya.

Kondisi iklim di wilayah NTT menyebabkan curah hujan di daerah tersebut memiliki karakteristik yang khas dibandingkan daerah lain. Menurut Sopiana (2017), secara geografis NTT merupakan daerah yang memiliki iklim sabana yang ditandai dengan adanya padang rumput yang luas. Hal ini dibuktikan dari data curah hujan historis di Provinsi NTT memiliki bulan kering yang cukup panjang, kurang lebih delapan bulan kering berturut-turut. Data BMKG yang tersedia untuk NTT cukup panjang yang memungkinkan untuk melakukan analisis historis dalam analisis pola iklimnya. Data tersebut menunjukkan bahwa pola rata-rata perbedaan curah hujan di musim hujan (Desember–Maret) dan musim kemarau (April–November) cukup signifikan.

Kondisi iklim NTT yang cenderung kering ini, sering kali diperparah oleh kejadian El Niño. Fenomena El Niño pada kurun waktu 20 tahun terakhir terjadi pada tahun 1994, 1997, 2001, 2003, 2004, dan 2006. Tahun El Niño tersebut berdampak kuat terhadap produktivitas tanaman padi dan jagung di Indonesia, khususnya NTT. Pada Gambar 3.1 terlihat dengan jelas bahwa produktivitas dan produksi tanaman padi dan jagung mengalami penurunan yang sangat signifikan (Ruminta, 2016) dan ditunjukkan dengan nilai persentase. Dampak perubahan iklim terhadap produksi padi dari sawah beririgasi disebabkan oleh kenaikan suhu dan curah hujan dihitung berdasarkan penurunan hasil dan luas panen setelah terjadi perubahan iklim (Abbas & Mayo, 2020).



Catatan: Garis kuning menunjukkan tahun kejadian El Niño

Sumber: Ruminta dan Handoko (2012) dalam Ruminta (2016)

Gambar 3.1 Luas Panen dan Produksi Tanaman Pangan Utama (Padi dan Jagung) di Indonesia (1993–2009)

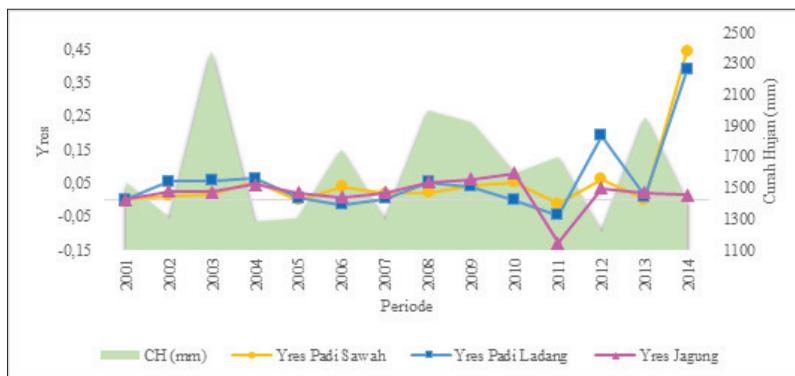
B. Korelasi Indeks Iklim Global, Curah Hujan, dan Produktivitas Padi serta Jagung di Nusa Tenggara Timur

Perubahan iklim global akan berdampak terhadap curah hujan yang akan berpengaruh terhadap produktivitas padi dan jagung (Adhikari et al., 2015). Provinsi Nusa Tenggara Timur yang memiliki komoditas unggulan padi dan jagung, secara tidak langsung akan terdampak produktivitasnya (Nugroho & Maftukhah, 2018). Keterkaitan antara perubahan iklim global, curah hujan, dan produktivitas, dapat dilihat dengan penelitian yang memerlukan berbagai data dari tahun 1995–2015 atau selama 20 tahun, di antaranya data curah hujan Provinsi Nusa Tenggara Timur, data Southern Oscillation Index (SOI), data Anomaly of Sea Surface Temperature (ASST) yang terdiri dari Niño 3, Niño West, dan Niño 3.4. Selain itu, dibutuhkan data produktivitas tanaman padi sawah, padi ladang, dan jagung tahun 2001–2014. Data-data tersebut kemudian digunakan untuk mencari korelasinya dengan curah hujan wilayah, dalam periode tahunan, 6 bulan, dan 3 bulan. Selain itu juga dilakukan analisis korelasi data produktivitas dengan curah hujan wilayah periode tahunan.

Potensi hasil tanaman padi erat hubungannya dengan jaminan ketersediaan air selama musim tanam (Taslim & Fagi, 1988). Nilai korelasi menunjukkan seberapa erat hubungan antara indeks iklim global dengan curah hujan. Jika nilai makin positif atau makin negatif maka hubungan akan makin erat. ASST Nino West memiliki nilai korelasi dengan tingkat hubungan paling tidak erat jika dibandingkan yang lain (Boonwichai et al., 2018). Korelasi dengan tingkat hubungan tererat terjadi pada periode Januari–Maret (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Nilai Korelasi Iklim Global dan Curah Hujan

Tahunan	Periode						
	per 6 Bulan			per 3 Bulan			
	Okt–Mar	Apr–Sep	Okt–Des	Jan–Mar	Apr–Jun	Jul–Sep	
ASST Niño 3	-0,4278	-0,4993	-0,3805	-0,1915	-0,561	-0,2173	-0,1893
ASST Niño West	0,3018	0,2485	0,271	0,0718	0,3652	0,1632	0,2958
ASST Niño 3.4	-0,4564	-0,4374	-0,5004	-0,1373	-0,5387	-0,3638	-0,2665
SOI	0,5051	0,3651	0,553	0,0734	0,488	0,5174	0,3348



Gambar 3.2 Hubungan Curah Hujan dan Produktivitas (Yres) Skala Provinsi

Gambar 3.2 menunjukkan hubungan curah hujan dengan produktivitas yang telah diolah datanya menjadi Yresidual pada komoditas padi sawah, padi ladang, dan jagung dalam skala provinsi. Yresidual merupakan selisih data tercatat dengan data yang terkoreksi (*smoothing*). Pada tahun 2001–2010 perubahan tidak terjadi secara signifikan atau dengan kata lain cenderung stabil pada ketiga komoditas. Perubahan mulai terlihat pada tahun 2011–2014. Secara grafis terlihat hubungan yang berbanding terbalik antara curah hujan dan produktivitas, yaitu jika curah hujan makin tinggi maka produktivitas makin rendah dan begitu pula sebaliknya dengan perubahan yang signifikan terjadi pada tahun 2013 ke 2014 pada padi sawah dan padi ladang dari yang mulanya mendekati 0,00 menjadi 0,44 dan 0,39.

Tabel 3.2 Nilai Korelasi Curah Hujan dan Produktivitas

No.	Kabupaten	Padi Sawah	Padi Ladang	Jagung
1	Sumba Barat	-0,3382	-0,1886	-0,0753
2	Sumba Timur	-0,2211	-0,1925	-0,2087
3	Kupang	-0,3562	-0,1178	-0,0451
4	Timor Tengah Selatan	-0,0808	-0,1913	-0,1591
5	Timor Tengah Utara	-0,1752	-0,2083	-0,0334
6	Belu	-0,2579	0,0975	0,0368
7	Alor	0,0228	-0,2271	0,1854
8	Lembata	0,1284	-0,1948	0,1723
9	Flores timur	-0,0652	-0,3974	0,0649
10	Sikka	0,1107	-0,2298	0,1176
11	Ende	-0,0737	-0,1902	0,2827
12	Ngada	-0,1015	-0,1482	0,1875
13	Manggarai	-0,1204	-0,1999	0,4049
14	Rote Ndao	-0,1350	-0,0150	0,2415
15	Manggarai Barat	-0,3167	-0,4187	0,7234
16	Sumba Barat Daya	-0,6918	-0,7385	-0,4630
17	Sumba Tengah	0,2218	-0,7028	0,2946
18	Nagekeo	-0,4022	-0,6248	-0,2529
19	Manggarai Timur	-0,5727	-0,4435	-0,3302
20	Sabu Raijua	-0,6279	-0,5473	0,5408
21	Malaka	-	-	-
22	Kota Kupang	-0,1436	-0,2107	0,6088
Secara Provinsi		-0,2107	-0,2520	-0,0074

Dari Tabel 3.2 dapat dilihat nilai korelasi secara provinsi yang dihasilkan untuk komoditas padi sawah, padi ladang, dan jagung, yaitu -0,2107; -0,2520; dan -0,0074. Dari nilai tersebut dapat diketahui bahwa secara provinsi curah hujan dengan produktivitas berbanding terbalik, apabila dilihat dalam skala kabupaten, komoditas padi sawah dan padi ladang cenderung memiliki korelasi negatif, sedangkan pada komoditas jagung sebaliknya, yaitu lebih dari sebagian kabupatennya memiliki korelasi positif meskipun nilai korelasinya cenderung rendah. Hubungan tererat pada padi (sawah maupun ladang) terjadi di Kabupaten Sumba Barat Daya dengan nilai korelasi, yaitu sebesar

-0,6918 dan -0,7385, sedangkan hubungan tererat pada jagung di Kabupaten Manggarai Barat sebesar 0,7234.

C. Pola Curah Hujan dan Indeks Kekeringan, serta Klasifikasi Iklim di Nusa Tenggara Timur

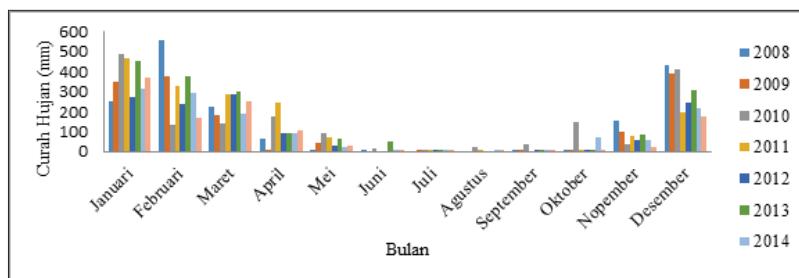
Selain berpengaruh langsung terhadap tingkat produksi tanaman pangan, perubahan iklim juga memiliki pengaruh tidak langsung yang dapat menurunkan produktivitas tanaman pangan dengan meningkatnya serangan hama dan penyakit. Pada musim hujan, berkembang penyakit tanaman, yaitu kresek dan blas pada tanaman padi, antranoksa pada cabai, dan sebagainya. Pada musim kemarau berkembang hama penggerek batang padi, hama belalang kembara, dan *thrips* pada cabai (Wiyono, 2007). Terdapat hubungan erat antara perubahan iklim dan produksi pertanian (Winarto et al., 2013). Pengaruh perubahan iklim terhadap pertanian bersifat multidimensional, mulai dari sumber daya, infrastruktur pertanian, dan sistem produksi, hingga ketahanan pangan, kesejahteraan petani dan masyarakat pada umumnya (Jolánkai et al., 2019).

Komoditas unggulan di Provinsi NTT adalah padi dan jagung yang tergolong sensitif terhadap perubahan iklim. La Niña dapat mengakibatkan banjir (*flooded*), sedangkan El Niño dapat menyebabkan kekeringan. Gagal panen total yang terjadi akibat kekeringan tahun 2016 mencapai 59,7 ribu hektare dengan pertanaman padi sekitar 20 ribu hektare (Rachmawati, 2016). Sementara itu, analisis kekeringan dengan menggunakan nilai indeks kekeringan digunakan untuk mempelajari interaksi iklim terkait dengan pola hujan atau debit yang pernah terjadi sebelumnya sehingga dapat melakukan manajemen dengan baik terhadap pemanfaatan air hujan dalam hal ini untuk kebutuhan air suatu daerah (Vicenter-Serrano et al., 2012).

Selain itu, kekeringan juga dapat memberikan dampak buruk kepada masyarakat berupa kekurangan pangan bahkan hilangnya pekerjaan bagi masyarakat petani. Ketiadaan curah hujan dalam kurun waktu yang lama bahkan melebihi waktu musim kemarau bisa memengaruhi semua sektor kehidupan. Selain itu kekeringan

tidak hanya berdampak pada daerah yang mengalami kekeringan saja, tetapi dapat meluas ke daerah lainnya karena memengaruhi sektor ekonomi, pangan, dan sumber daya yang dibutuhkan orang banyak (Ziolkowska, 2016).

Ditinjau dari kondisi nilai curah hujan dari Provinsi NTT, dapat diprediksi bahwa pola curah hujan yang terjadi di Provinsi NTT adalah pola curah hujan monsunal. Pola monsunal dicirikan oleh distribusi curah hujan bulanan berbentuk V dengan jumlah curah hujan musiman rendah pada bulan Juni, Juli, atau Agustus. Pada kondisi normal, saat monsun barat akan mendapat curah hujan yang berlimpah (musim hujan), sedangkan pada saat monsun timur jumlah curah hujannya sangat sedikit (musim kemarau). Pada pola hujan monsunal wilayahnya memiliki perbedaan yang jelas antara periode musim hujan dan periode musim kemarau (Gunarsih, 1988).



Sumber: Kondisi geografis (2016)

Gambar 3.3 Grafik Curah Hujan (mm/Bulan) Versus Waktu (Bulan)

Gambar 3.3 menunjukkan tren grafik curah hujan vs. waktu menggunakan data rata-rata curah hujan di semua regional. Terlihat bahwa tren yang terjadi di semua tahun menunjukkan hal yang relatif sama, yakni memiliki satu puncak musim hujan yang muncul di sekitar bulan Desember hingga Februari. Hal ini menunjukkan bahwa di NTT memiliki pola curah hujan monsunal yang memiliki ciri berbentuk V dan hanya memiliki satu puncak musim hujan.

Analisis pola curah hujan wilayah dibagi dalam dua kelompok analisis, yaitu analisis pola curah hujan pada saat musim hujan dan analisis pola curah hujan pada saat musim kemarau. Musim hujan yang ditinjau dari bulan Desember–Maret di Provinsi NTT dari periode tahun 2008–2015 diketahui memiliki curah hujan yang cukup tinggi. Hal ini dibuktikan pada data curah hujan yang hampir di setiap tahunnya nilai akumulasi curah hujan pada periode musim hujan berkisar di angka 1000–2000 mm/musim hujan. Fenomena La Niña juga memengaruhi pola curah hujan di Provinsi NTT.

Selain itu, La Niña juga memengaruhi pola distribusi hujan di wilayah Provinsi NTT. Berdasarkan data yang diperoleh La Niña terjadi pada musim hujan tahun 2008, 2009, dan 2010–2011, sedangkan El Niño terjadi pada musim hujan tahun 2010 dan musim kemarau tahun 2015. Perbedaan pola hujan ini disebabkan karena pada periode La Niña kumulatif curah hujan akan meningkat, sedangkan pada saat terjadi El Niño, kumulatif curah hujan akan berkurang seperti yang telah dikemukakan sebelumnya.

Pada musim kemarau pola hujan wilayah Provinsi NTT berbeda dengan pola hujan pada saat musim hujan. Musim kemarau di NTT memiliki karakteristik yang khas dikarenakan dalam bulan-bulan tertentu, nilai curah hujan yang tercatat di stasiun penakar hujan dapat mencapai nilai nol (0) tanpa hujan sama sekali. Hal ini sangat berbeda ketika bulan-bulan basah di musim hujan NTT, nilai curah hujan dapat mencapai 300 mm/bulan. Sebaran curah hujan yang cukup tinggi hampir merata di setiap regional. Hal ini dikarenakan adanya pengaruh dari perubahan fenomena La Niña yang sangat dominan sehingga terjadi hujan sepanjang tahun di Provinsi NTT. Pola curah hujan Provinsi NTT selalu berubah seiring berjalanannya waktu. Pola curah hujan di Provinsi NTT ini selalu berubah selain dipengaruhi oleh La Niña dan El Niño, juga dipengaruhi oleh kondisi geografis dan keadaan unsur iklim yang lainnya dari Provinsi NTT.

Setiap bulan, nilai curah hujan yang terjadi di setiap regional memiliki perbedaan. Perbedaan nilai curah hujan tersebut mengakibatkan terjadinya perbedaan nilai indeks kekeringan dengan metode

SPI (Blain et al., 2022). Nilai indeks kekeringan yang tersaji. Kemudian, diklasifikasikan ke dalam lima penggolongan seperti pada Tabel 3.3. Penggolongan ini dilakukan sebagai upaya untuk mengkualitatifkan nilai indeks kekeringan dalam suatu kelompok dengan kondisi relatif sama untuk mempermudah proses analisis selanjutnya.

Tabel 3.3 Nilai Indeks Kekeringan (SPI) Regional 2 (2008–2015)

Bulan	Tahun							
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Januari	0,1	-0,8	0,1	1,9	0,1	0,5	-0,5	-1,5
Februari	1,7	0,1	-1,2	1,1	-0,5	0,4	-0,8	-0,9
Maret	-0,4	-0,7	-0,5	1,0	1,6	0,8	-1,1	-0,7
April	-0,6	-1,0	1,0	2,0	-0,4	-0,1	-0,6	-0,3
Mei	-1,2	0,5	-0,2	-0,2	-0,7	2,1	-0,4	0,0
Juni	0,0	-0,6	-0,3	-0,6	-0,6	2,4	-0,2	-0,2
Juli	-0,6	-0,6	2,0	-0,6	-0,6	1,2	-0,4	-0,5
Agustus	-0,5	-0,5	2,4	-0,3	-0,5	-0,5	0,4	-0,5
September	-0,6	0,0	2,3	-0,6	-0,6	-0,6	0,5	-0,4
Oktober	-0,5	-0,5	2,2	-0,4	-0,5	-0,5	0,8	-0,5
November	2,3	-0,4	-0,3	0,0	-1,0	0,1	-0,2	-0,5
Desember	1,1	0,1	1,8	-1,3	0,1	-0,5	-0,6	-0,6
Rerata	0,1	-0,4	0,8	0,2	-0,3	0,4	-0,3	-0,5

Terlihat bahwa nilai SPI pada bulan Juni, Juli, dan Agustus pada stasiun David Constantijn Saudale relatif lebih stabil daripada bulan-bulan lainnya karena curah hujan yang terjadi dari tahun ke tahun tidak begitu mengalami perubahan dan pada bulan-bulan tersebut sedang mengalami musim kemarau, sedangkan pada bulan-bulan lainnya nilai SPI rata-rata selalu mengalami perubahan, hal ini karena perubahan jumlah curah hujan dari tahun ke tahun yang tidak menentu. Pada tahun-tahun tertentu, nilai SPI mengalami lompatan data. Seperti pada tahun 2010 di bulan kemarau (Juli–Oktober), nilai SPI menunjukkan kategori basah. Hal ini terjadi karena nilai curah

hujan pada bulan tersebut di tahun 2010 tercatat memiliki nilai yang cukup tinggi. Hal ini menjadi faktor yang membuat nilai SPI pada bulan tersebut mengalami fluktuasi yang cukup tinggi.

Penyebaran indeks kekeringan maksimum Provinsi NTT dari tahun ke tahun dalam periode 2008–2015 terus berubah. Seperti pada tahun 2009–2010 di regional 1 kondisi kekeringan parah serta di regional 2 dan 4 mengalami kekeringan sedang, sedangkan pada regional 3 mengalami perubahan di tahun 2009 kekeringan sedang kemudian di tahun 2010 mengalami kondisi hampir normal. Pada tahun 2008 dan 2012, seluruh regional mengalami kekeringan sedang, sedangkan pada tahun 2013, semua regional mengalami kondisi hampir normal. Hal ini menunjukkan bahwa di tahun tersebut terjadi pemerataan curah hujan di regional 1–regional 4. Pada tiga tahun terakhir (2013–2015) terjadi kenaikan nilai indeks kekeringan dari klasifikasi hampir normal hingga pada regional 1 terlihat berubah menjadi kekeringan parah.

Nilai SPI maksimum yang didapat tidak selalu berada dalam bulan-bulan kering, hal ini dapat terjadi pada bulan-bulan basah. Ketika terjadi El Niño, nilai SPI menjadi rendah yang berarti kekeringan meningkat, di mana seperti pada tahun 2010 hampir di seluruh stasiun nilai kekeringan maksimum terjadi pada bulan Februari, hal ini karena jumlah curah hujan pada bulan januari tahun 2010 jauh di bawah jumlah curah hujan rata-rata bulan Januari di stasiun-stasiun tersebut. Fenomena La Niña menyebabkan curah hujan di sebagian besar wilayah Indonesia bertambah. Hal ini dapat terlihat juga pada data curah hujan yang lebih tinggi serta nilai SPI bulanan dan rata-rata tahunan yang lebih tinggi pula (keadaan minimum), tetapi nilai SPI maksimum tidak terlalu berpengaruh pada kondisi La Niña. Pada tahun 2010 saat kondisi La Niña rata-rata nilai hujan lebih tinggi dibandingkan tahun-tahun lainnya, bahkan saat bulan-bulan kering malah terjadi hujan yang lebih besar dibandingkan tahun-tahun lainnya. Perbedaan nilai hujan dengan kondisi normalnya sangat memengaruhi nilai SPI itu sendiri.

Dalam bab ini, klasifikasi iklim menggunakan metode klasifikasi iklim menurut Oldeman, di mana di dalam pembagian iklim Oldeman lebih menitikberatkan pada banyaknya bulan basah dan bulan kering secara berturut-turut yang dikaitkan dengan sistem pertanian untuk daerah-daerah tertentu. Oldeman membuat sistem baru dalam klasifikasi iklim yang dihubungkan dengan pertanian menggunakan unsur iklim hujan. Ia membuat dan menggolongkan tipe-tipe iklim di Indonesia berdasarkan pada kriteria bulan-bulan basah dan bulan-bulan kering secara berturut-turut pada Tabel 3.4. Kriteria dalam klasifikasi iklim didasarkan pada perhitungan masa bulan basah (BB), masa bulan lembap (BL), dan masa bulan kering (BK). Setelah didapat hasil perhitungannya, dikelompokkan ke dalam zona yang telah dibagikan menurut Oldeman.

Tabel 3.4 Data Klasifikasi Sifat Hujan Provinsi NTT (2008–2015)

No	Bulan	Curah Hujan (mm)							
		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	Januari	BB	BB	BB	BB	BB	BB	BB	BL
2	Februari	BB	BB	BL	BB	BB	BB	BL	BL
3	Maret	BL	BL	BL	BB	BB	BB	BL	BL
4	April	BK	BK	BB	BB	BK	BL	BK	BK
5	Mei	BK	BL	BK	BK	BK	BB	BK	BK
6	Juni	BK	BK	BK	BK	BK	BL	BK	BK
7	Juli	BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK
8	Agustus	BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK
9	September	BK	BK	BL	BK	BK	BK	BK	BK
10	Oktober	BK	BK	BL	BK	BK	BK	BK	BK
11	November	BB	BK						
12	Desember	BB	BB	BB	BK	BB	BB	BL	BL

Pada Tabel 3.4 didapatkan hasil pengklasifikasian iklim Provinsi NTT termasuk ke dalam klasifikasi iklim tipe D-4. Hal ini diketahui dari nilai data klasifikasi sifat curah hujan di Provinsi NTT pada periode tahun 2008–2015 yang menunjukkan bahwa rerata sifat curah hujan di Provinsi NTT mengalami bulan basah 3–4 bulan

(Tabel 3.5) secara berurutan setiap tahunnya. Nilai yang didapatkan dapat dikategorikan dalam kategori iklim D-4 menurut Oldeman, sedangkan penggolongan iklim terhadap sistem budi daya pertanian di setiap zona, masuk zona D-4, yakni wilayah pertaniannya hanya dapat menanam satu kali palawija dan satu kali padi sawah (Tabel 3.6).

Tabel 3.5 Curah Hujan Rerata Bulanan Periode Tahun 2008–2015 Stasiun Curah Hujan David Constantijn Saudale

Bulan	CH (mm)	Keterangan
Januari	349	Bulan Basah
Februari	300	Bulan Basah
Maret	219	Bulan Basah
April	118	Bulan Lembap
Mei	84	Bulan Kering
Juni	25	Bulan Kering
Juli	7	Bulan Kering
Agustus	8	Bulan Kering
September	21	Bulan Kering
Oktober	23	Bulan Kering
November	85	Bulan Kering
Desember	295	Bulan Basah

Tabel 3.6 Hubungan Sistem Bercocok Tanam di Tiap Zona

Tipe Iklim	Penjabaran
A1, A2	Sesuai untuk padi terus menerus, tetapi produksi kurang karena pada umumnya kerapatan fluks radiasi surya rendah sepanjang tahun.
B1	Sesuai untuk padi terus menerus dengan perencanaan awal musim tanam yang baik. Produksi tinggi bila panen musim kemarau.
B2	Dapat tanam padi dua kali setahun dengan varitas umur pendek dan musim kering yang pendek cukup untuk tanaman palawija
C1	Tanam Padi dapat sekali dan palawija dua kali setahun
C2, C3, C4	Tanam Padi dapat sekali dan palawija dua kali setahun, tetapi penanaman palawija yang kedua harus hati-hati jangan jatuh pada bulan kering

Tipe Iklim	Penjabaran
D1	Tanam padi umur pendek satu kali dan biasanya produksi bisa tinggi karena kerapatan fluks radiasi tinggi. Waktu tanam palawija.
D2, D-3, D-4	Hanya mungkin satu kali padi atau satu kali palawija setahun tergantung pada adanya persediaan air irigasi.
E	Daerah ini umumnya terlalu kering, mungkin hanya dapat satu kali palawija, itupun tergantung adanya hujan.

D. Analisis Neraca Air untuk Menentukan Kalender Tanam Pertanian Padi dan Jagung di Nusa Tenggara Timur

Perubahan iklim yang terjadi dapat berpengaruh pada produktivitas tanaman jagung. Salah satu upaya adaptasi yang paling jitu dalam menghadapi dampak perubahan iklim, seperti kondisi iklim yang tidak menentu dan pergeseran musim, adalah melakukan penetapan pola tanam dan kalender tanam dengan mempertimbangkan kondisi iklim (Runtuwu et al., 2013). Menurut Kedang dan Haruna (2008), hasil analisis neraca air menunjukkan bahwa surplus air di wilayah NTT terjadi pada bulan Desember–April, sedangkan defisit air terjadi pada bulan Mei–November. Periode saat terjadi surplus air pada bulan Desember–April sangat menguntungkan untuk membudidayakan tanaman padi, sedangkan periode saat terjadi defisit air pada bulan Mei–November sangat menguntungkan untuk membudidayakan tanaman jagung. Mawardi (2012) menjelaskan bahwa jika laju evapotranspirasi ini lebih besar dari laju penyerapan air oleh akar tanaman, tanaman akan mengalami kelayuan.

Padi membutuhkan air yang cukup untuk pertumbuhan dan perkembangannya. Kebutuhan air dimaksud merupakan jumlah air yang dibutuhkan oleh tanaman untuk melakukan proses pertumbuhannya mulai dari tanam hingga panen yang dapat diketahui melalui kehilangan air akibat evapotranspirasi (Dash et al., 2020). Meskipun padi, khususnya padi sawah lazim, ditanam dengan metode penggenangan, tetapi padi bukanlah merupakan tanaman air (hidrofit). Padi mampu hidup dalam kondisi tergenang karena me-

miliki kemampuan mengoksidasi lingkungan perakarannya sendiri. Kemampuan mengoksidasi ini berbeda-beda tergantung daya adaptasi masing-masing jenis atau varietas padi. Secara prinsip padi sawah lebih toleran genangan dibandingkan padi gogo dan padi sawah rawa lebak atau sawah pasang surut lebih toleran terhadap genangan dibandingkan padi sawah biasa. Kemampuan adaptasi varietas padi sawah terhadap kelebihan air juga bervariasi, tergantung sifat genetik varietas bersangkutan. Secara umum, padi sawah dapat bertahan dalam kondisi kelebihan air karena memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap kelebihan air. Terdapat beragam pendapat tentang kemampuan adaptasi padi sawah terhadap kelebihan air, seperti perbedaan kemampuan morfologis (Suwignyo, 2007), kemampuan fisiologis (Suwignyo, 2007; Liao & Lin, 2001; Hairmansis et al., 2012; Mahmod et al., 2014) karena pengaruh level ABA dan IAA endogenous (Mapelli et al., 1995), akibat kinerja etilen (Dai et al., 2012), dan berbagai mekanisme adaptasi lainnya. Toleransi tanaman padi sawah terhadap kelebihan air dapat diamati dari perbedaan mekanisme fisiologis ataupun molekuler.

Kondisi tanaman yang mengalami kelayuan dapat diatasi dengan menghitung prediksi neraca air tiap masa tanam. Prediksi neraca air diperoleh dari hasil prediksi curah hujan (Apriyana et al., 2021). Untuk memprediksi curah hujan, penelitian ini menggunakan metode Thomas-Fiering. Cara pembangkitan data dengan analisis stokastik akan memperoleh hasil prediksi curah hujan. Prediksi curah hujan dan neraca air dapat digunakan untuk menentukan kalender tanam atau masa tanam. Kalender tanam dilihat dari ketersediaan air tanaman tiap fase dan simpangan minimum antara curah hujan efektif dengan kebutuhan air tanaman (Siddiqi, 1992).

Hasil dari penentuan curah hujan dan analisis neraca air bermanfaat untuk menetapkan kalender tanam di suatu wilayah yang berkaitan dengan jenis tanaman yang sesuai pada wilayah dan waktu tertentu agar diperoleh hasil panen yang maksimal. Selain itu, neraca air juga dapat bermanfaat untuk menentukan debit irigasi yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan tanaman pertanian. Menurut

Wairata (2012), masa tanam di Kabupaten Kupang dibagi menjadi tiga masa tanam. Bulan November–bulan Februari adalah masa tanam 1, bulan Maret–Juni adalah masa tanam 2, dan bulan Juli–Oktober adalah masa tanam 3. Padi termasuk tanaman dengan masa budi daya kurang lebih 4 bulan, sedangkan jagung kurang lebih 3 bulan. Secara umum, padi yang ditanam di Kabupaten Kupang masuk pada masa tanam 1 di mana curah hujan yang tersedia sekitar 200 mm/bulan (Tabel 3.7). Pada masa tanam 2 di Kabupaten Kupang jagung mulai ditanam dengan curah hujan yang dibutuhkan berkisar 100 mm/bulan (Tabel 3.8). Selain itu, klasifikasi iklim di Kabupaten Kupang termasuk ke dalam zona D-4, artinya hanya mampu ditanami padi dan palawija sekali selama satu musim. Kalender tanam diperoleh berdasarkan selisih antara curah hujan efektif dengan kebutuhan air tanaman (padi dan jagung). Apabila nilai simpangan tersebut makin kecil, makin baik kualitas tanaman padi dan jagung tersebut.

Tabel 3.7 Neraca Air Padi di Kabupaten Kupang

Periode	Padi	
	Defisit (mm/tahun)	Surplus (mm/tahun)
Januari 2016–April 2016	28,96	-
Desember 2016–Maret 2017	-	61,37
Desember 2017–Maret 2018	-	42,57
Januari 2019–April 2019	-	8,34
Desember 2019–Maret 2020	-	27,57

Tabel 3.8 Neraca Air Jagung di Kabupaten Kupang

Periode	Jagung	
	Defisit (mm/tahun)	Surplus (mm/tahun)
Desember 2016–Februari 2017	-	185,01
Januari 2017–Maret 2017	-	163,42
Desember 2017–Februari 2018	-	142,41
Januari 2019–Maret 2019	-	171,42
Januari 2020–Maret 2020	-	134,42

Berdasarkan analisis neraca air selama lima tahun (2016–2020) pada penelitian ini, terjadi pergesseran kalender tanam untuk padi dan jagung sehingga penelitian ini menggunakan empat variasi masa tanam untuk lima tahun ke depan. Keempat variasi masa tanam tersebut untuk dua tanaman, yakni padi dan jagung. Setiap tanaman mempunyai dua variasi masa tanam selama lima tahun mendatang. Tanaman padi memulai masa tanam pada bulan Desember–Maret dan bulan Januari–April. Tanaman jagung memulai masa tanam pada bulan Desember–Februari dan bulan Januari–Maret.

Padi												Padi			
Jagung												Jagung			
Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des	Jan	Feb	Mar	

Gambar 3.4 Kalender Tanam Padi dan Jagung di Kabupaten Kupang Tahun 2016–2017

Jagung												Padi			
Padi												Jagung			
Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des	Jan	Feb	Mar	

Gambar 3.5 Kalender Tanam Padi dan Jagung di Kabupaten Kupang Tahun 2017–2018

Padi												Padi			
Jagung												Jagung			
Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Okt	Nov	Des	Jan	Feb	Mar	

Gambar 3.6 Kalender Tanam Padi dan Jagung di Kabupaten Kupang Tahun 2019–2020

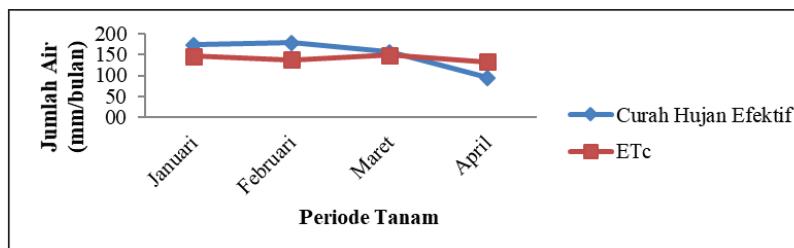
Hasil analisis neraca air membuktikan bahwa terjadi defisit dan surplus air terhadap kedua tanaman baik padi dan jagung. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, simpangan terkecil antara kebutuhan air tanaman (ETc) dan curah hujan efektif, yaitu periode tanam

yang jatuh pada bulan Desember dan Januari untuk tanaman padi dan jagung. Penentuan kebutuhan air tanaman (ETc) dilakukan sebelum menentukan kalender tanam padi dan jagung. Hasil kali antara nilai evapotranspirasi potensial (ETo) dengan koefisien masing-masing tanaman (Kc) pada tiap fase pertumbuhan adalah nilai kebutuhan air tanaman (ETc). Nilai koefisien tanaman padi dan jagung pada tiap fase pertumbuhan dapat dilihat pada Tabel 3.9.

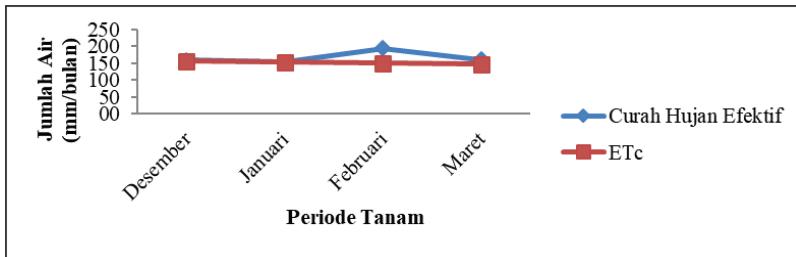
Tabel 3.9 Nilai Koefisien Tanaman Padi dan Jagung Berdasarkan Umur Tanaman

Umur Tanaman (Bulan)	Koefisian Tanaman (Kc)	
	Padi	Jagung
0,5	1,05	0,5
1	1,05	0,59
1,5	1,1	0,96
2	1,1	0,96
2,5	1,1	1,05
3	1,2	1,02
3,5	1,2	-
4	1,05	-

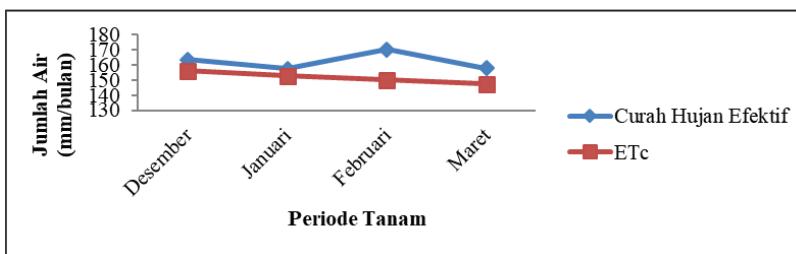
Nilai kebutuhan air tanaman (ETc) yang telah didapat dari hasil perhitungan digunakan untuk menentukan bentuk neraca air setiap tahun pada masing-masing masa tanam (padi dan jagung). Bulan-bulan defisit maupun surplus diketahui berdasarkan hasil perhitungan tersebut. Grafik neraca air untuk rencana kalender tanam padi dan jagung selama lima tahun ke depan ditunjukkan pada Gambar 3.7 hingga Gambar 3.16.



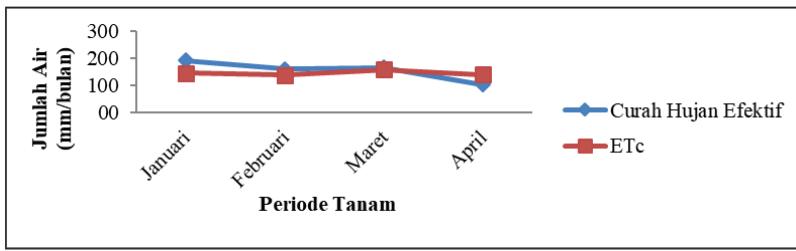
Gambar 3.7 Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Januari 2016–April 2016



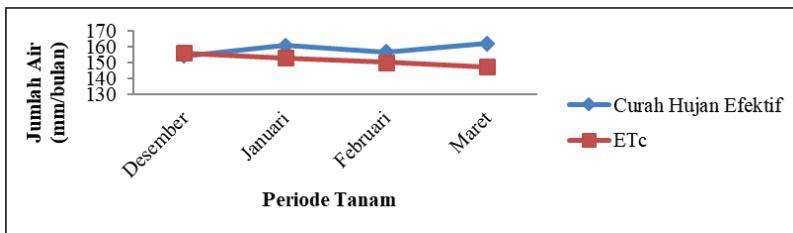
Gambar 3.8 Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Desember 2016–Maret 2017



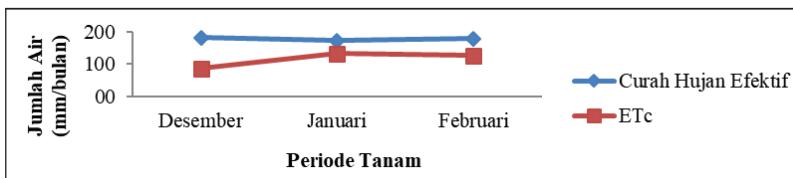
Gambar 3.9 Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Desember 2017–Maret 2018



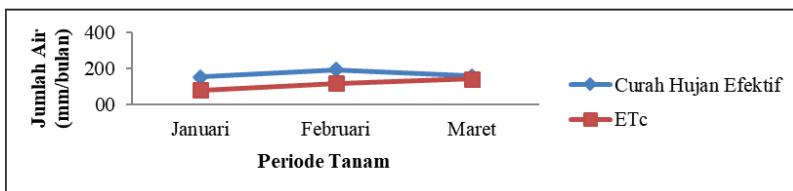
Gambar 3.10 Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Januari 2019–April 2019



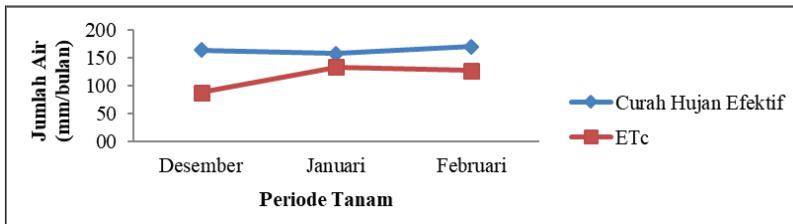
Gambar 3.11 Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Desember 2019–Maret 2020



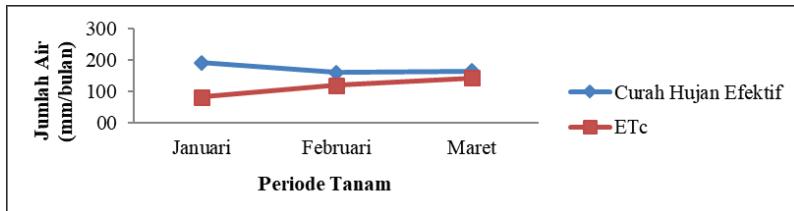
Gambar 3.12 Grafik neraca air tanaman jagung periode Desember 2016–Februari 2017



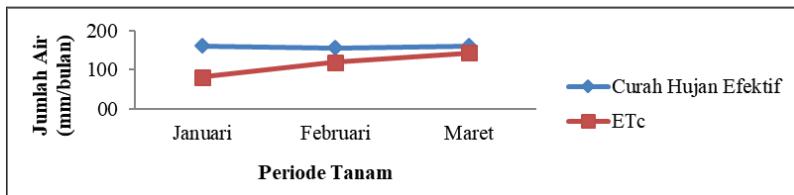
Gambar 3.13 Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Januari 2017–Maret 2017



Gambar 3.14 Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Desember 2017–Februari 2018



Gambar 3.15 Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Januari 2019–Maret 2019



Gambar 3.16 Grafik Neraca Air Tanaman Padi Periode Januari 2020–Maret 2020

Prediksi curah hujan selama tahun 2016–2020 hampir sama apabila ditinjau berdasarkan grafik neraca air di atas. Hal ini membuktikan bahwa curah hujan tidak mengalami perubahan yang ekstrem selama lima tahun mendatang. Pada analisis sebelumnya telah dijelaskan mengenai kebutuhan air tanaman untuk padi dan jagung. Tabel 3.10 sampai dengan Tabel 3.12 berikut ini adalah nilai kebutuhan air tanaman pada setiap masa tanam untuk masing-masing tanaman.

Tabel 3.10 Nilai Kebutuhan Air Padi pada Masa Tanam Bulan Desember

Rencana Kalender Tanam Padi	ETo (mm/bulan)	Kc	ETc (mm/bulan)	Jumlah
*Desember	148,55	1,05	155,98	
Januari	138,81	1,1	152,69	
Februari	124,9	1,2	149,88	605,73
Maret	140,17	1,05	147,18	

Keterangan: *) Mulai Tanam

Tabel 3.11 Nilai Kebutuhan Air Padi pada Masa Tanam Bulan Januari

Rencana Kalender Tanam Padi	ET ₀ (mm/bulan)	Kc	ET _c (mm/bulan)	Jumlah
*Januari	138,81	1,05	145,75	
Februari	124,9	1,1	137,39	
Maret	140,17	1,2	168,20	611,56
April	152,59	1,05	160,22	

Keterangan: *) Mulai Tanam

Tabel 3.12 Nilai Kebutuhan Air Padi pada Masa Tanam Bulan Desember

Rencana Kalender Tanam Jagung	ET ₀ (mm/bulan)	Kc	ET _c (mm/bulan)	Jumlah
*Desember	148,37	0,59	87,54	
Januari	138,81	0,96	133,26	348,19
Februari	124,9	1,02	127,40	

Keterangan: *) Mulai Tanam

Tabel 3.13 Nilai Kebutuhan Air Padi pada Masa Tanam Bulan Januari

Rencana Kalender Tanam Jagung	ET ₀ (mm/bulan)	Kc	ET _c (mm/bulan)	Jumlah
*Januari	138,81	0,59	81,90	
Februari	124,9	0,96	119,90	344,78
Maret	140,17	1,02	142,97	

Keterangan: *) Mulai Tanam

Proses tanam padi di Kabupaten Kupang umumnya dilakukan pada masa tanam 1, yakni bulan November, tetapi berdasarkan prediksi neraca air pada penelitian ini terjadi pergeseran kalender tanam. Kalender tanam padi dimulai pada bulan Desember dan Januari. Sementara itu, jagung umumnya ditanam pada bulan Maret karena bulan tersebut masuk ke dalam masa tanam 2, tetapi prediksi neraca air pada penelitian ini membuktikan bahwa terjadi pergeseran masa tanam. Kalender tanam jagung dimulai pada bulan Desember dan Januari. Kalender tanam sangat diperlukan untuk menghasilkan

produksi padi dan jagung yang sesuai harapan mengingat perubahan iklim yang tidak menentu dapat menyebabkan gagal panen, serangan hama, dan sebagainya.

E. Penutup

Pengaruh iklim global yang diwakili oleh ASST Niño 3, Niño West, Niño 3.4, dan SOI terhadap curah hujan di Provinsi Nusa Tenggara Timur secara periode tahunan dan enam bulan tergolong lemah hingga sedang. Sementara itu, pada periode tiga bulan, untuk periode Oktober–Desember tergolong berkorelasi sangat lemah, periode Januari–Maret tergolong lemah hingga sedang, periode April–Juni tergolong sangat lemah hingga sedang, dan periode Juli–September tergolong sangat lemah hingga lemah.

Korelasi pada ASST Niño 3 dan Niño 3.4 cenderung berbanding terbalik terhadap curah hujan, sedangkan pada ASST Niño West dan SOI terjadi korelasi yang cenderung berbanding lurus. Korelasi dengan hubungan yang sangat erat berada pada bulan Januari–Maret. Hubungan curah hujan dan perubahan produktivitas pada tanaman padi sawah, padi ladang, dan jagung pada skala provinsi berturut-turut memiliki nilai korelasi sebesar -0,2107; -0,252; dan -0,0074 yang tergolong sangat lemah hingga lemah; pada skala kabupaten hubungan tererat antara curah hujan dan perubahan produktivitas pada tanaman padi sawah dan padi ladang terjadi di Kabupaten Sumba Barat Daya dengan nilai korelasi, yaitu sebesar -0,6918 dan -0,7385; sedangkan pada tanaman jagung di Kabupaten Manggarai Barat sebesar 0,7234.

Perlu dilakukan prediksi potensi air hujan yang dapat dimanfaatkan untuk menentukan kalender tanam atau masa tanam. Kalender tanam dilihat dari ketersediaan air tanaman tiap fase dan simpangan minimum antara curah hujan efektif dengan kebutuhan air tanaman. Selain itu, dengan menggunakan metode klasifikasi iklim Oldeman, iklim di wilayah Provinsi NTT termasuk zona D-4. Zona tersebut mempunyai sistem bercocok tanam satu kali tanam padi dan satu kali tanam palawija.

Penggunaan varietas jagung tidak dilakukan secara selektif oleh petani karena petani hanya memerlukan hasil yang didapatkan dibandingkan varietas jagung yang digunakan. Varietas jagung yang ditanam adalah varietas yang mudah didapatkan di daerah tersebut dan berpotensi memiliki hasil panen yang tinggi. Penggunaan varietas unggul yang sesuai dengan lingkungan perlu dilakukan untuk menunjang pertumbuhan dan hasil tanaman. Menurut Bunyamin dan Aqil (2010), penggunaan varietas unggul terutama varietas yang dapat menekan seminimal mungkin pengaruh akibat interaksi intraspesies maupun interspesies, merupakan langkah intensifikasi untuk tetap mempertahankan serta meningkatkan produksi tanaman jagung dengan model penanaman sisipan, terutama varietas yang dapat mengoptimalkan penggunaan cahaya. Selain itu, perlu juga dilakukan pemilihan varietas yang memiliki umur pendek agar panen yang dilakukan lebih cepat dan tidak terpengaruh oleh perubahan iklim. Perakitan varietas unggul jagung umur pendek (80–90 hari) dan super pendek (70–80 hari) merupakan salah satu upaya untuk mengurangi kegagalan panen akibat dampak perubahan iklim, seperti periode hujan yang pendek. Penggunaan varietas unggul jagung berumur pendek diperlukan oleh petani, terutama untuk menyesuaikan pola tanam dengan ketersediaan air. Di lahan sawah, tanaman jagung biasanya diusahakan setelah panen padi sehingga diperlukan varietas jagung berumur genjah. Varietas jagung berumur genjah umumnya cukup tenggang terhadap kekeringan (Aqil et al., 2013).

Menurut Rejekiningrum dan Kartiwa (2015), pemberian air irigasi dan waktu pemberian sangat penting untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air dan memaksimalkan produksi. Tanaman jagung lebih toleran terhadap kekurangan air pada fase vegetatif dan fase pematangan/masak. Penurunan hasil terbesar terjadi apabila tanaman mengalami kekurangan air pada fase pembungaan, bunga jantan dan bunga betina muncul, dan pada saat terjadi proses penyerbukan. Penurunan hasil tersebut disebabkan oleh kekurangan air yang mengakibatkan penghambatan proses pengisian biji karena bunga betina/tongkol mengering sehingga jumlah biji dalam tongkol

berkurang. Petani melakukan rotasi tanam apabila perubahan iklim terjadi, yaitu dengan melakukan penanaman padi pada awal musim hujan dan pada saat pergantian musim hujan ke musim kemarau petani melakukan penanaman jagung karena masa peralihan musim hujan ke musim kemarau sesuai untuk pertumbuhan tanaman jagung.

Prediksi cuaca dan iklim ke depan akan memengaruhi produktivitas komoditas pertanian pada masa depan. Contoh kasus di Provinsi Nusa Tenggara Timur memperlihatkan bagaimana pengaruh cuaca dan iklim terhadap produktivitas padi dan jagung dan tentunya pada masa mendatang, prediksi cuaca dan iklim akan menjadi penentu dalam ketersediaan pangan di Indonesia.

Referensi

- Abbas, S., & Mayo, Z. (2020). Impact of temperature and rainfall on rice production in Punjab, Pakistan. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 1706–1728. <https://doi.org/10.1007/S-10668-020-00647-8>.
- Adhikari, U., Nejadhashemi, A., & Woznicki, S. (2015). Climate change and eastern Africa: a review of impact on major crops. *Food and Energy Security*, 4, 110–132. <https://doi.org/10.1002/FES-3.61>.
- Kondisi geografis. (2016). NTTPROV.GO.ID. Diakses pada ____ dari <http://nttprov.go.id/ntt2016/index.php/profildaerah1/kondisi-geografis>
- Apriyana, Y., Pramudia, A., Koswara, M. R. S., & Misnawati. (2021). Adjusting planting time using water balance and rainfall prediction approaches. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 648, Artikel 012108). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/648/1/012108>.
- Aqil, M., Bunyamin, Z., & Andayani, N. N. (2013). Inovasi teknologi adaptasi tanaman jagung terhadap perubahan iklim. Dalam *Seminar nasional inovasi teknologi pertanian* (39–48). https://www.academia.edu/10237128/INOVASI_TEKNOLOGI_ADAPTASI_TANAMAN_JAGUNG_TERHADAP_PERUBAHAN_IKLIM
- Ariffin. (2019). *Metode klasifikasi iklim di Indonesia*. UB Press.
- Blain, G., Sobierajski, G., Weight, E., Martins, L., & Xavier, A. (2022). Improving the interpretation of standardized precipitation index estimates to capture drought characteristics in changing climate

- conditions. *International Journal of Climatology*, 42, 5586–5608. <https://doi.org/10.1002/joc.7550>.
- Boonwichai, S., Shrestha, S., Babel, M., Weesakul, S., & Datta, A. (2018). Climate change impacts on irrigation water requirement, crop water productivity and rice yield in the Songkhram River Basin, Thailand. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.07.146>.
- Bunyamin, Z. D., & Aqil, M. (2010). Analisis iklim mikro tanaman jagung (*Zea mays* L) pada sistem tanaman sisip. *Pekan Serealia Nasional. Maros: Kementan*. https://www.academia.edu/7038026/ANALISIS_IKLIM_MIKRO_TANAMAN_JAGUNG_Zea_Mays_L_PADA_SISTEM_TANAM_SISIP.
- Dai, F., Zhang, C., Jiang, X., Kang, M., Yin, X., Lü, P., Zhang, X., Zheng, Y., & Gao, J. (2012). RhNAC2 and RhEXPA4 are involved in the regulation of dehydration tolerance during the expansion of rose petals. *PLANT PHYSIOLOGY*, 160(4), 2064–2082. <https://doi.org/10.1104/pp.112.207720>
- Dash, S., Debnath, S., & Behera, M. (2020). Evaluation of evapotranspiration methods for rice yield simulation in a tropical river basin. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9, 2560–2566. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.905.292>.
- Doorenbos, J. & W.O. Pruitt. (1977). *Crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24) Food and Agric. Organiz. of the U.N <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a60d6c27-3fe1-4eab-8b0f-679312c70a57/content>
- Gunarsih, A. (1988). *Klimatologi*. Bina Aksara.
- Hairmansis, A., Supartono, Kustianto, B., Suwarno, & Pane, H., (2012). Perakitan dan pengembangan varietas unggul baru padi toleran rendaman air Inpara 4 dan Inpara 5 untuk daerah rawan banjir. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, 31(1–7). <https://dx.doi.org/10.21082/jp3.v31n1.2012.p%p>
- Hulme, M. & Sheard, N. (1999). *Climate change scenarios for Indonesia*. Climatic Research Unit.
- Jolánkai, M., Birkás, M., Tarnawa, Á., & Kassai, K. (2019). Agriculture and climate change. *International Climate Protection*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03816-8_10.

- Karuniasa, M., & Pambudi, P. (2023). The analysis of the El Niño phenomenon in the East Nusa Tenggara Province, Indonesia. *Journal of Water and Land Development*. <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.140388>.
- Kedang, A. & Haruna. (2008). *Pengkajian waktu tanam dan pola tanam pada agroekosistem lahan kering dan sawah tada hujan di NTT* [Laporan akhir tahun 2008]. Balai Pengkajian Teknologi Pertanian.
- Liao, C. T., & Lin, C. H. (2001). Physiological adaptation of crop plants to flooding stress. *Proceedings of the National Science Council, Republic of China. Part B, Life Sciences*, 25(3), 148–157.
- Mahmod, I.F, Barakbah, S. S., Osman, N., & Omar, O. (2014). Physiological response of local rice varieties to aerobic condition. *International Journal of Agriculture and Biology*, 16, 738–744.
- Mapelli, S., Locatelli, F., & Bertani, A. (1995). Effect of anaerobic environment on germination and growth of rice and wheat: Endogenous levels of ABA and IAA. *Bulg J Plant Physiol*, 21(2–3), 33–41.
- Mawardi, M. (2012). *Rekayasa konservasi tanah dan air*. Bursa Ilmu.
- Nugroho, B., Arif, C., & Maftukhah, R. (2018). Cropping calendar scenario based on climate projections against regional climate change in the southern part of Indonesia. Dalam A. Sukartiko, T. Nuringtyas, S. Marliana, A. Isnansetyo, (Ed.), *Proceeding of the 2nd international conference on tropical agriculture* (15–23). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97553-5_2.
- Rachmawati, Y. (2016, 27 Mei). Lahan pertanian 59,7 ribu hektare di NTT alami gagal panen. *Tribun News*. <http://www.tribunnews.com/regional/2016/05/27/laahan-pertanian-597-ribu-hektar-di-ntt-alami-gagal-panen>
- Rejekiningrum, P. & Kartiwa, B. (2015). Upaya meningkatkan produksi tanaman jagung menggunakan teknik irigasi otomatis di lahan kering Kabupaten Lombok Barat, Nusa Tenggara Barat. Dalam *Prosiding seminar nasional masyarakat biodiversitas Indonesia* (Vol. 1, No. 8, 2027–2033). Smujo International. <https://smujo.id/psnmbi/article/download/1386/1341/1333>
- Ruminta, R. (2016). Analisis penurunan produksi tanaman padi akibat perubahan iklim di Kabupaten Bandung Jawa Barat. *Kultivasi*, 15(1). <https://doi.org/10.24198/kultivasi.v15i1.12006>

- Ruminta., & Handoko. (2012). *Kajian risiko dan adaptasi perubahan iklim pada sektor peranian di Sumatera Selatan* [Laporan penelitian]. KLH Jakarta.
- Runtunuwu, E., Syahbuddin, H., & Ramadhani, F. (2013). Kalender tanam sebagai instrumen adaptasi perubahan iklim. Dalam H. Soeparno, E. Pasandaran, M. Syarwani, A. Dariah, S. M. Pasaribu, N. S. Saad (Ed.), *Politik pembangunan pertanian menghadapi perubahan iklim* (271–297). IAARD Press..
- Siddiqi, M. (1992). Analysis of daily rainfall data to know the best planting dates of summer and winter season crops in Islamabad. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11 (1).
- Sopiana., & Angga. (2017). *5 Klasifikasi iklim menurut Koppen*. Diakses pada tanggal 14 Mei, 2023, dari <http://www.sridianti.com/klasifikasiiklim-menurut-koppen.html>
- Suwignyo, R. A. (2007). Ketahanan tanaman padi terhadap kondisi terendam: Pemahaman terhadap karakter fisiologis untuk mendapatkan kultivar padi yang toleran di lahan rawa lebak. Dalam *Kongres ilmu pengetahuan wilayah Indonesia bagian barat*.
- Taslim, H., & Fagi, A. M. (1988). **Ragam budi daya padi dalam padi Buku 1.** Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, 319.
- Vicente-Serrano, S., Begueri'a, S., Lorenzo-Lacruz, J., , J., Camarero, J., Lo'pez-Moreno, J., Azorín-Molina, C., Revuelto, J., Mora'n-Tejeda, E., & Sanchez-Lorenzo, A. (2012). Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions*, 16, 1–27. <https://doi.org/10.1175/2012EI000434.1>.
- Wairata, E. J. (2012). Sistem penentuan prioritas tanaman di Kota Kupang berbasis analytical hierarchy process (AHP) [Disertasi]. Magister Sistem Informasi Program Pascasarjana FTI-UKSW.
- Winarto, Y. T., Stigter, K., Dwisatrio, B., Nurhaga, M., & Bowolaksono, A. (2013). Agrometeorological learning increasing farmers' knowledge in coping with climate change and unusual risks. *Southeast Asian Studies*, 2(2), 323–349. https://englishkyoto-seas.org/wp-content/uploads/SEAS_0202_Winarto-et-al..pdf
- Wiyono, S. (2007, 28 Juni 2007). *Tantangan masa depan Indonesia: Perubahan iklim dan ledakan hama penyakit tanaman* [Presentasi makalah]. Seminar Sehari tentang Keanekaragaman Hayati di Tengah Perubahan Iklim, Indonesia.

- Yohe, G., & Tol, R. S. (2002). Indicators for social and economic coping capacity—moving toward a working definition of adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 12(1), 25–40. [https://doi.org/10.1016/s0959-3780\(01\)00026-7](https://doi.org/10.1016/s0959-3780(01)00026-7)
- Ziolkowska, J. (2016). Socio-economic implications of drought in the agricultural sector and the state economy. *Economies*, 4, 19. <https://doi.org/10.3390/ECONOMIES4030019>.

Bab IV

Sistem Prediksi Iklim atau Model Iklim? Pemodelan untuk Prediksi Iklim?

Prawira Yudha Kombara, Amalia Nurlatifah,
Aulia Arip Rakhman

A. Tantangan Iklim dalam Peningkatan Ketahanan Pangan

Dewasa ini iklim di bumi telah menunjukkan tanda-tanda perubahan. Masifnya peningkatan aktivitas manusia yang menggunakan energi bahan bakar fosil telah mengakibatkan terjadinya pemanasan global. Pemanasan global ini memberi dampak berubahnya iklim di bumi menjadi lebih cepat. Berubahnya iklim akan memberikan dampak ke berbagai sektor dalam kehidupan manusia dan salah satunya adalah pertanian. Sektor pertanian sangat bergantung pada pola iklim dan cuaca karena menentukan berhasil tidaknya suatu program pertanian. Pola iklim berperan dalam penentuan kapan waktu awal bercocok tanam dan waktu untuk memanen hasil pertanian. Dengan tidak

P. Y. Kombara, A. Nurlatifah, & A. A. Rakhman
Badan Riset dan Inovasi Nasional, e-mail: pyudha15@gmail.com

© 2024 Editor & Penulis

Kombara, P. Y., Nurlatifah, A., & Rakhman, A. A. (2024). Sistem prediksi iklim atau model iklim? Pemodelan untuk prediksi iklim. Dalam D. E. Nuryanto & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (89–118). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1244.c1388.
E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

menentunya pola iklim saat ini tentunya akan menyulitkan para pemangku kebijakan untuk merancang program pertanian. Salah satu upaya yang bisa dilakukan untuk merancang program pertanian adalah melakukan prediksi iklim. Prediksi iklim dilakukan untuk mengetahui bagaimana pola iklim pada masa mendatang sehingga dapat menentukan kemungkinan atau peluang yang terbaik ketika merancang program pertanian. Dengan demikian, dapat diharapkan bahwa sektor pangan di Indonesia memiliki tingkat ketahanan yang cukup dalam menghadap perubahan iklim yang terus terjadi.

Prediksi iklim dikemas dalam sebuah sistem sehingga menjadi sistem prediksi iklim. Untuk memprediksi iklim di suatu lokasi pertanian, dibutuhkan perangkat lunak yang disebut sebagai model iklim dengan di dalamnya terdapat beberapa komponen pembentuk iklim.

Model iklim merupakan alat penting untuk memahami dan memudahkan dalam memprediksi perilaku iklim pada berbagai skala waktu, baik itu jangka panjang (seratus tahun), jangka waktu menengah (tahun dan dekade), maupun jangka waktu pendek, seperti prediksi harian dan musiman. Model iklim bekerja berdasarkan proses fisis yang telah terdokumentasi untuk mampu menyimulasikan transfer energi dan material dalam sistem iklim. Sistem iklim itu sendiri terdiri dari beberapa komponen, yaitu atmosfer, hidrosfer, kriosfer, permukaan daratan, dan biosfer (McGuffie & Henderson-Sellers, 2005). Model iklim menggunakan persamaan matematis yang menunjukkan karakter energi dan materi serta interaksinya antar-komponen iklim. Hal tersebut merupakan hal yang sangat kompleks sehingga diperlukan dukungan sistem komputer dengan spesifikasi yang tinggi, bahkan superkomputer.

B. Iklim dan Komponennya

Iklim didefinisikan sebagai rata-rata kondisi atmosfer di suatu wilayah selama 30 tahun. Kondisi atmosfer meliputi beberapa variabel fisis atmosfer, seperti variabel temperatur, kelembapan, tekanan, curah hujan, dan angin (Goosse et al., 2008; McGuffi & Henderson-Sellers, 2005). Periode waktu 30 tahun didasarkan kepada peraturan World

Meteorological Organization (WMO) yang menyatakan pendefinisian statistik iklim membutuhkan sejumlah data dalam kurun waktu 30 tahun (Goosse et al., 2008). Pada dasarnya iklim merupakan salah satu bagian dari sistem di bumi. Dengan demikian, iklim merupakan subsistem dari satu kesatuan sistem yang ada di bumi. Selain kondisi atmosfer, iklim di suatu wilayah terbentuk karena adanya komponen pembentuk iklim. Seperti yang disebutkan sebelumnya, komponen iklim terdiri dari atmosfer, hidrosfer, kriosfer, permukaan daratan, dan biosfer (McGuffie & Henderson-Sellers, 2005). Semua komponen tersebut berinteraksi satu sama lain membentuk pola iklim.

1. Atmosfer

Lapisan gas yang menyelimuti seluruh bumi ini memiliki peranan penting untuk keberlangsungan kehidupan di bumi. Tanpa atmosfer, kehidupan tidak akan pernah ada di bumi. Jika dilihat dari luar angkasa, atmosfer tampak seperti lapisan tipis yang menyelimuti bumi. Walaupun terlihat tipis, peranannya sangat penting. Atmosfer memiliki peranan untuk menjaga suhu di permukaan bumi agar tidak terlalu panas dan terlalu dingin sehingga makhluk hidup dapat hidup. Selain itu atmosfer juga melindungi bumi dari benda-benda luar angkasa, seperti asteroid, dan juga menyaring sinar ultraviolet dari matahari yang berbahaya bagi kehidupan di bumi.

Komponen atmosfer terdiri dari gas-gas, seperti nitrogen, oksigen, ozon, karbon dioksida, argon, dan gas-gas lainnya. Secara vertikal, atmosfer terbagi menjadi beberapa lapisan, seperti troposfer, stratosfer, mesosfer, dan termosfer. Fenomena cuaca dan iklim terjadi di lapisan paling bawah, yakni troposfer. Ketebalan lapisan troposfer ini bergantung pada koordinat lintang. Makin mendekati wilayah khatulistiwa (lintang 0°) maka troposfer akan makin tebal. Kondisi di atmosfer sebenarnya sangat kacau atau biasa disebut *chaotic* seperti yang diutarakan oleh Edward Lorenz pada 1963 dalam jurnalnya yang berjudul *Deterministic Non-Periodic Flow*. Oleh karena itu, memprediksi kondisi atmosfer yang dilakukan sebenarnya adalah hasil dari

pendekatan atau estimasi sehingga nilai dari prediksi atmosfer akan selalu memiliki eror.

2. Hidrosfer

Hidrosfer merupakan komponen pembentuk iklim yang terdiri dari lapisan air di atas dan di bawah permukaan bumi termasuk lautan. Baik itu air yang bersifat asin maupun tawar akan berinteraksi dengan atmosfer dan memengaruhi pola iklim dan cuaca. Hidrosfer, terutama lautan, memiliki peranan menyimpan panas dan menampung gas-gas rumah kaca agar tidak dilepaskan seluruhnya ke atmosfer sehingga menjaga keseimbangan pertukaran panas dan gas rumah kaca.

3. Kriosfer

Kriosfer merupakan lapisan es yang ada di bumi, baik itu yang ada di kutub utara, selatan, puncak gunung tinggi, maupun dalam bentuk glesser dan dataran es. Keberadaan lapisan es di bumi berfungsi untuk menjaga keseimbangan sifat asin air laut. Selain itu, lapisan es merupakan cadangan air tawar dalam jangka waktu yang lama yang memiliki peran dalam keseimbangan neraca radiasi dan energi.

4. Permukaan Daratan

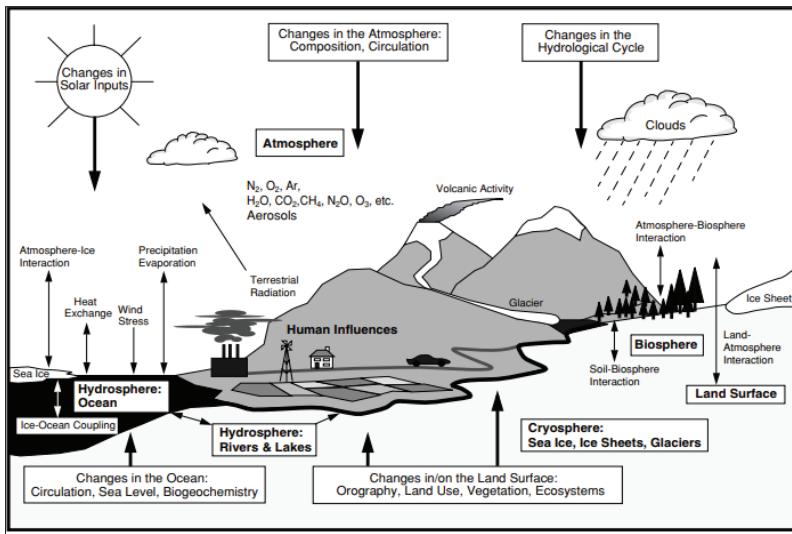
Permukaan daratan merupakan tempat di mana sebagian besar makhluk hidup tinggal, seperti hewan, tanaman, dan juga manusia. Selain berperan sebagai tempat tinggal sebagian besar makhluk hidup, permukaan daratan juga menentukan pola iklim di suatu tempat. Permukaan daratan yang berupa dataran tinggi akan memiliki iklim yang berbeda dengan dataran rendah, serupa dengan dataran yang merupakan daerah perkotaan dan perdesaan. Begitu juga daerah yang memiliki banyak vegetasi, seperti hutan dan padang sabana dengan daerah tandus yang memiliki sedikit vegetasi, seperti gurun pasir.

5. Biosfer

Biosfer merupakan komponen yang terdiri organisme tumbuhan atau vegetasi maupun organisme di lautan. Keberadaan vegetasi memengaruhi jumlah penguapan dan suplai uap air di suatu daerah

sehingga memengaruhi iklim dan cuaca di daerah tersebut. Selain itu, pertukaran gas dan sirkulasi energi radiasi yang menggerakkan iklim pun dipengaruhi oleh keberadaan vegetasi. Meskipun demikian, pola iklim tentunya memengaruhi siklus hidup vegetasi sehingga iklim dan vegetasi saling memengaruhi satu sama lain. Selain itu, keberadaan vegetasi berperan dalam neraca persediaan air tanah yang nantinya akan memengaruhi suplai air ke sungai melalui mata air. Makin jauh lagi, komponen biosfer memengaruhi komponen iklim yang lainnya, seperti hidrosfer dan atmosfer.

Interaksi antarkomponen iklim digambarkan sebagai sistem iklim dan dapat dipengaruhi oleh beberapa mekanisme dorongan secara eksternal maupun internal. Faktor pendorong internal, antara lain, ialah radiasi matahari. Efek dari aktivitas manusia terhadap sistem iklim digolongkan sebagai pendorong eksternal. Aktivitas manusia, seperti emisi besar-besaran polutan primer, gas rumah kaca, dan perubahan tutupan lahan, mengakibatkan dorongan eksternal penyebab perubahan sistem iklim berubah. Interaksi-interaksi antarkomponen iklim, baik yang didorong oleh faktor internal maupun eksternal ini telah banyak dilakukan oleh para ilmuwan yang mempelajari tentang perubahan iklim maupun proses iklim atau model iklim (Baede et al., 2007). Secara singkat, sistem iklim dan interaksinya digambarkan dalam Gambar 4.1.



Sumber: Baede et al. (2007)

Gambar 4.1 Skema dari Sistem Iklim Global (Cetak Tebal), Proses dan Interaksinya (Panah Tipis), serta Beberapa Aspek yang Mungkin Berubah (Panah Tebal)

C. Sejarah Model Iklim

Model iklim sebenarnya merupakan pengembangan model prediksi cuaca yang mana prediksi cuaca pertama kali dikembangkan pada tahun 1940. Pada saat itu, seorang ilmuwan bernama Vilhelm Bjerknes (1862–1951) adalah orang pertama yang mengemukakan bahwa prediksi cuaca merupakan permasalahan dari persamaan matematika dan fisika. Bjerknes berpendapat agar sirkulasi yang ada di atmosfer dapat dihitung, persamaan kekekalan massa, momentum, dan energi harus dirumuskan. Lalu, Lewis Fry Richardson (1881–1953) merupakan orang pertama yang menyelesaikan persamaan-persamaan dalam prediksi cuaca secara numerik pada tahun 1917. Pada tahun 1922, Lewis Fry Richardson mengembangkan Numerical Weather Prediction (NWP) pertama. Dia membuat teknik menghitung yang menjadi cikal bakal Model Sirkulasi Global/Global Circulation Model

(GCM). Teknik-teknik tersebut, di antaranya mengubah divisi ruang menuju sel dan perkembangan metode *finite difference* dalam mencari solusi persamaan diferensial.

Pada tahun 1940, ketika komputer digital sudah bisa digunakan dalam proses otomatisasi, teknik yang dikembangkan Richardson menjadi lebih praktis dan umum untuk digunakan (Richardson, 1922). Selanjutnya pada tahun 1940–1950-an, komputer pertama di dunia diciptakan dengan nama ENIAC yang merupakan akronim dari Electronic Numerical Integrator and Computer. Sejak saat itu, model-model atmosfer telah menggunakan komputer untuk menghasilkan simulasi dan prediksi, seperti pada tahun 1956 di mana model sirkulasi global yang pertama kali dijalankan. The Royal Swedish Air Force Weather Service di Stockholm adalah yang pertama di dunia dalam mengembangkan prediksi numerik cuaca secara *realtime* dan rutin. The Institute of Meteorology di Universitas Stockholm di bawah Carl-Gustaf Rossby mengembangkan model ini. Prediksi untuk kawasan utara Atlantik dibuat tiga kali seminggu di komputer Swedish BESK, mulai Desember 1954 (Bergthorsson et al., 1955; Institute of Meteorology, 1954).

Tahun-tahun berikutnya berkembang teori *chaos* di atmosfer yang dikemukakan oleh Edward Lorenz pada 1963. Konsep *chaos* di atmosfer sangat berperan dalam perkembangan dan perbaikan model atmosfer ke depannya yang mana dalam teori ini menyatakan bahwa perubahan sekecil apa pun atau data input yang berbeda sekecil apa pun dapat menghasilkan prediksi yang sangat berbeda antara satu dengan yang lainnya. Pada sekitar pertengahan tahun 1960-an, model laut tiga dimensi telah berhasil dirumuskan oleh Bryan dan Cox pada 1967. Semenjak itu muncul ide-ide dan perkembangan baru mengenai pemodelan iklim.

Laboratorium pertama yang mengembangkan program pemodelan sirkulasi global secara kontinu dibuka pada 1955. Pada tahun tersebut, Joseph Smagorinsky, Von Neumann, Charney, dan Philips mengembangkan *two-level, zonal hemispheric model* menggunakan subset dan persamaan primitif (Smagorinsky, 1958). Dimulai pada

tahun 1959, dia mengembangkan *nine-level* persamaan primitif GCM (Smagorinsky, 1963). Lab pertamanya bernama The General Circulation Research Laboratory (GCRL). Smagorinsky termasuk orang yang pertama dalam mengenali kebutuhan kopel model laut untuk GCM atmosfer. Dia merekrut seorang modeler laut, Kirk Bryan ke GCRL pada tahun 1961 (Smagorinsky, 1983). The General Circulation Research Laboratory lalu diubah namanya menjadi Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) pada tahun 1963.

Sebelum tahun 1965, di Amerika Serikat telah terbentuk tiga organisasi besar yang mengembangkan pemodelan sirkulasi global, yaitu Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), UCLA Department of Meteorology, dan National Center for Atmospheric Research.

1. Manabe dan Program Pemodelan Sirkulasi Global GFDL

Pada tahun 1959, Smagorinsky mengundang Syukuro Manabe dari Grup Tokyo NWP untuk bergabung ke GCRL. Sebelum tahun 1963, Smagorinsky, Manabe, dan kolaborator mereka menyelesaikan *nine-level, hemispheric primitive equation* dari GCM (Manabe, 1967; Manabe, et al. 1965; Smagorinsky et al., 1965). Pada pertengahan 1960-an, Manabe menjadi pemimpin proyek GCM di GFDL. Hingga masa pensiunnya pada tahun 1998, Manabe menjadi pemimpin program pengembangan GCM yang paling bersemangat dan panjang di dunia. Gaya bekerja Manabe yang sangat kolaboratif, mengantarkan dia dan koleganya (Strickler, Wetherland, Holloway, Stouffer, dan Bryan) menjadi tim pertama yang mengembangkan eksperimen karbon dioksida bersama GCM (Manabe, 1970).

Beberapa Model Sirkulasi Global yang dikembangkan GFDL, antara lain,

- 1) MARKFORT,
- 2) Zodiac,
- 3) Sector,
- 4) SKYHI,
- 5) GFDL Spectral Model, dan
- 6) Supersource.

2. Departemen Meteorologi, Universitas California, Los Angeles (UCLA)

Jacob Bjerknes, penemu UCLA Department of Meteorology pada tahun 1940, mempunyai ketertarikan yang kuat terhadap permasalahan sirkulasi umum atmosfer. Tradisi ini berlanjut kepada Yale Mintz, seorang murid Bjerknes yang menyelesaikan program doktornya pada tahun 1949. Dia kemudian melanjutkan pekerjaan Bjerknes di UCLA. Pada akhir 1950-an, Mintz mulai merancang eksperimen sirkulasi umum numerik (Mintz, 1958).

Seperti Smagorinsky, Mintz merekrut seorang meteorologis Jepang bernama Akio Arakawa untuk membantunya mengembangkan GCM. Arakawa, tertarik membangun skema *robust* untuk parameterisasi konveksi kumulus. Mintz dan Arakawa mulai membangun series GCM yang rumit pada tahun 1961 (Johnson & Arakawa, 1996). Generasi pertama model GCM UCLA diselesaikan pada tahun 1963. Pada pertengahan 1960-an, komputer saintifik skala besar IBM di San Jose, California, mulai dapat mendeskripsikan model skala manual (Langlois & Kwok, 1969).

Dari semua grup GCM di dunia, Laboratorium UCLA mungkin memiliki pengaruh terbesar dibandingkan yang lain, terutama pada tahun 1960 dan 1970. Ini bukan hanya merupakan inovasi secara kontinu (parametersisasi kumulus), melainkan juga keterbukaan UCLA untuk kolaborasi dan berbagi (Arakawa, 1997). GCM yang dikembangkan oleh UCLA, antara lain,

- 1) UCLA I,
- 2) UCLA II,
- 3) UCLA II (3-level),
- 4) UCLA III, dan
- 5) UCLA IV.

3. The National Centre of Atmospheric Research (NCAR)

The National Centre of Atmospheric Research (NCAR) yang didirikan pada tahun 1960 mulai membentuk GCM pada tahun 1964 di bawah

Akira Kasahara dan Warren Washington. Dua *series model* mulai dibangun, didesain sebagai NCAR 1-3 dan GCM 0-1.

Selain tiga organisasi besar yang disebutkan di atas, juga bermunculan beberapa grup kecil, antara lain,

- 1) grup kecil di UK Meteorological Office mulai melakukan riset untuk GCM di bawah Andrew Gilchrist, tetapi hanya terpublikasikan skala kecil hingga tahun 1970-an,
- 2) RAND Corporation (Santa Monica, California),
- 3) Goddard Institute for Space Studies (New York, New York), dan
- 4) Australian Numerical Meteorological Research Centre (Melbourne, Australia).

D. Prinsip Dasar

Pada bagian sebelumnya, telah dijelaskan bahwa di dunia ini telah muncul beberapa kelompok yang berusaha memodelkan kondisi iklim dan cuaca yang ada. Namun, sebenarnya apa yang termasuk dalam perhitungan model-model iklim? Model iklim pada umumnya dikembangkan berdasarkan hukum dan persamaan yang digunakan dalam mekanisme fisik, kimia, dan biologi yang ada. Salah satu prinsip fisika dasar yang digunakan adalah hukum pertama termodinamika atau hukum kekekalan energi, yang menyatakan bahwa dalam sistem tertutup, energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dihilangkan, hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Prinsip dasar lainnya adalah hukum Stefan-Boltzman mengenai radiasi benda hitam. Hukum Stefan-Boltzman tersebut digunakan untuk menjelaskan efek rumah kaca yang membuat permukaan bumi lebih hangat sekitar 33°C dibandingkan jika tanpa efek rumah kaca.

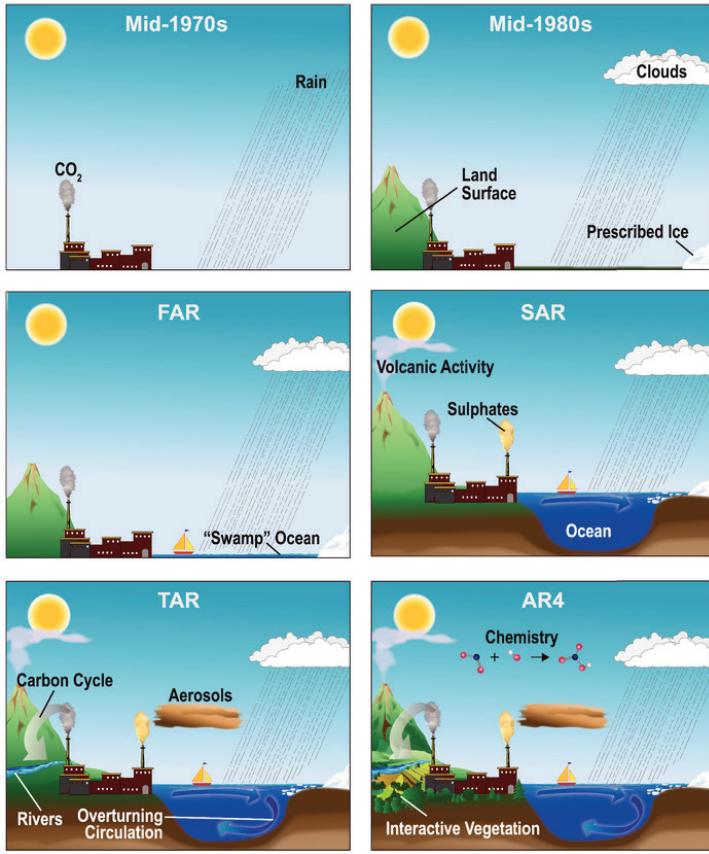
Untuk dapat menjelaskan dinamika hubungan suhu dan tekanan uap air maksimum dalam atmosfer, digunakan persamaan Clausius-Clapeyron, sedangkan untuk menjelaskan kecepatan, tekanan, suhu, dan kepadatan gas di atmosfer dan air di lautan, digunakan persamaan gerak fluida Navier-Stokes yang dimodifikasi dan disesuaikan untuk menghitung aliran melintasi bola bumi yang berputar. Berikut ini

adalah persamaan Navier-Stoker yang sederhana (bukan untuk lintasan berputar). Persamaan Navier-Stokes untuk aliran “tidak dapat dimampatkan” dalam tiga dimensi (x, y, dan z).

$$\begin{aligned}\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial y} v + \frac{\partial u}{\partial z} w \right] &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \\ \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} u + \frac{\partial v}{\partial y} v + \frac{\partial v}{\partial z} w \right] &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \\ \rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial x} u + \frac{\partial w}{\partial y} v + \frac{\partial w}{\partial z} w \right] &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z\end{aligned}\quad (4.1)$$

Pada umumnya, persamaan-persamaan ini diselesaikan secara “numerik” sehingga hasilnya merupakan perkiraan. Masing-masing prinsip fisika diterjemahkan ke dalam persamaan-persamaan yang membentuk kode komputer, dan sering kali mencapai lebih dari satu juta baris untuk model iklim global. Dalam persamaan di atas, tampak ada parameter ‘t’ yang mewakili waktu, dan parameter x, y, z yang mewakili dimensi ruang. Langkah waktu dalam model iklim dapat dalam hitungan menit, jam, hari, bulan, atau tahun. Ukuran ruang sering disebut sebagai ukuran sel grid yang menunjukkan resolusi spasial dari model. Makin kecil ukuran grid maka resolusi model makin tinggi. Makin tinggi resolusi spasial dan resolusi waktu suatu model maka akan makin besar beban komputasinya. Selain itu, kompleksitas model turut menentukan kebutuhan spesifikasi komputer yang dibutuhkan. Pada tahun 1970-an, model iklim pada umumnya hanya mempertimbangkan curah hujan berdasarkan prediksi CO₂. Pada periode berikut, terdapat parameter-parameter tambahan untuk memprediksi parameter iklim. Beberapa faktor yang dijadikan parameter tambahan dalam model iklim antara lain permukaan daratan, lapisan es, lautan, aktivitas vulkanologis, interaksi vegetasi, dan siklus karbon. Secara singkat, perkembangan model iklim selama beberapa dekade terakhir disajikan pada Gambar 4.2.

The World in Global Climate Models



Keterangan: Ilustrasi proses yang ditambahkan ke model iklim global selama beberapa dekade, mulai pertengahan tahun 1970an, melalui empat laporan penilaian IPCC. Pertama, *Far* yang diterbitkan pada tahun 1990, kedua *Sar* pada tahun 1995, ketiga *Tar* pada tahun 2001 dan yang keempat *AR4* pada tahun 2007 dan ada juga laporan kelima yang diselesaikan pada tahun 2014.

Sumber: IPCC AR4 (2014)

Gambar 4.2 Ilustrasi Proses yang Ditambahkan Ke Model Iklim Global

Buku ini tidak diperjualbelikan.

E. Inovasi Pemodelan

Dua inovasi penting dalam bidang pemodelan yang ditemukan pada tahun 1965–1975, yaitu *coupled atmosphere-ocean models* dan *spectral transform techniques*.

1. Coupled Atmosphere-Ocean Models

GFDL adalah termasuk grup pertama dalam mengembangkan model kopel atmosfer dan laut. Manabe dan Bryan mempublikasikan hasil pertama kopel *ocean-atmosphere general circulation model* (OAGCM) (Manabe et al., 1975).

2. Spectral Transform Techniques

Metode *spectral* pertama yang menjadi alternatif adalah skema *finite-difference*. Persamaan ini mengekspresikan variasi horizontal medan model dinamik dalam hal *orthogonal spherical harmonics*. Teknik ini menyederhanakan solusi dari persamaan diferensial nonlinier yang digunakan dalam pemodelan sirkulasi global. Penggunaannya diteliti lebih lanjut pada awal 1954 (Platzman, 1960; Silberman, 1954).

Perhitungan besar membutuhkan metode *spectral* yang tidak cocok dalam penggunaan awal GCM. Komputer yang lebih cepat dan perbaikan algoritma untuk metode *spectral* yang mengurangi intensitas perhitungan, menggiring adopsi perhitungan *spectral* ini dalam penggunaan GCM pada tahun 1970 (Bourke, 1974; Eliasen et al., 1970, Orszag, 1970).

F. Riset di Bidang Karbon Dioksida dan Iklim

Peran penting karbon dioksida, uap air, dan gas rumah kaca lainnya di atmosfer sebagai penyimpan panas atmosfer sudah dilakukan oleh ilmuwan Swedia, Svante Arrhenius pada abad 19-an. Dia juga meneliti kemungkinan adanya perubahan iklim dari bahan bakar fosil. Penelitian mengenai efek gas rumah kaca dilakukan hingga akhir 1940-an. Selama 1965–1975, studi mengenai perubahan konsentrasi karbon dioksida di permukaan bumi menjadi hal yang menarik, apalagi data

dari Mauna Loa menunjukkan peningkatan karbon dioksida secara konstan. Studi model iklim pertama menggunakan satu dan dua dimensional model (Manabe & Wetherland, 1967). Studi mengenai penggunaan dan kopel GCM dan karbon dioksida pertama dilakukan pada tahun 1975 (Manabe & Wetherald, 1975).

G. Sistem Model Iklim Gabungan (*Couple*) untuk Prediksi Iklim

Setelah mengetahui komponen iklim, lalu model iklim dan sejarah perkembangannya, sekarang menelusuri perihal model iklim yang sudah menjadi suatu sistem yang utuh. Berdasarkan pemaparan sebelumnya, komponen iklim terbagi menjadi beberapa bagian. Begitu juga dengan sistem model iklim yang lengkap atau dikenal sebagai sistem model iklim *couple* tiga dimensi. Disebut *couple* karena terdapat bagian-bagian lain selain bagian atmosfer. Sistem model iklim *couple* biasanya terdiri dari komponen-komponen yang menyusun pola iklim. Model iklim ini tersusun dari beberapa model di antaranya, model atmosfer, model laut, model lapisan es, dan model daratan (Hurrell et al., 2009; McGuffie & Henderson-Sellers, 2005). Semua bagian model tersebut menjadi satu kesatuan untuk melakukan perhitungan berdasarkan persamaan-persamaan fisika dan matematika secara numerik kemudian digunakan untuk memprediksi atau menyimulasikan iklim di bumi.

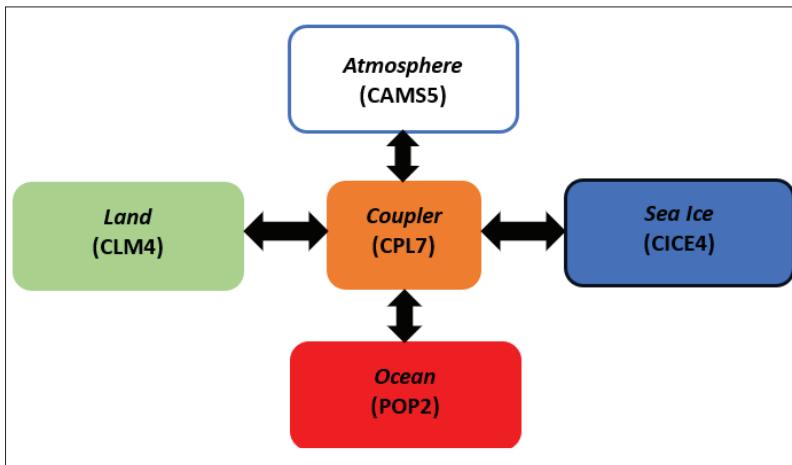
Model iklim *couple* sebenarnya merupakan model yang sangat kompleks dan rumit. Seperti yang disebutkan sebelumnya, komponen model iklim *couple* terdiri dari beberapa model. Selain itu, karena memiliki banyak komponen, tentunya ketika dijalankan model ini membutuhkan sumber daya komputasi yang tidak sedikit. Bahkan kebutuhan sumber daya komputasinya melebihi kebutuhan model prediksi cuaca. Meskipun begitu, hasil simulasi dari model *couple* relatif lebih realistik dibandingkan model iklim yang lebih sederhana. Ada banyak pilihan yang bisa kita gunakan tergantung dari tujuan kita menjalankan model tersebut. Selain itu, untuk mengantisipasi kebutuhan sumber daya yang besar, sebenarnya pengguna dibebaskan

apakah akan menggunakan semua komponen dari model iklim *couple* atau hanya beberapa bagian saja. Semua itu kembali lagi kepada kebutuhan pengguna.

Model iklim *couple* yang sering digunakan adalah model GCM atau *general circulation model* atau bisa juga disebut sebagai *global climate model*. Saat ini ada beberapa jenis GCM yang sering digunakan oleh para ilmuwan untuk memprediksi iklim atau bahkan menyimulasikan iklim pada masa lampau. Salah satu contoh produk dari model GCM adalah *the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5) yang dikembangkan oleh Working Group on Coupled Modelling (WGCM). CMIP5 merupakan data iklim yang diperoleh dari sistem model iklim *couple*. CMIP5 menyajikan data iklim untuk rentang waktu ratusan tahun dan puluhan tahun (10–30 tahun). CMIP5 banyak digunakan oleh para ilmuwan untuk mengkaji mengenai perubahan iklim. Lebih spesifik, model yang digunakan untuk menghasilkan data CMIP5 adalah model *atmosphere-ocean global climate model* (AOGCM) (Taylor et al., 2012). Walaupun sebenarnya saat ini CMIP sudah mencapai fase yang terbaru, yakni fase enam sebagaimana data tersebut telah digunakan oleh Kurniadi (2023) untuk mengidentifikasi peristiwa hujan ekstrem di Indonesia (Kurniadi et al., 2022). Data iklim CMIP dapat kita peroleh secara gratis dengan mengakses laman <https://esgf-index1.ceda.ac.uk/projects/esgf-ceda/>. Selain untuk mengidentifikasi peristiwa hujan ekstrem, tentunya data CMIP ini dapat digunakan untuk menentukan musim tanam dan musim panen dalam waktu jangka menengah dan panjang. Selain itu, kajian dan dampak dari perubahan iklim terhadap bidang pertanian pun dapat dilakukan (Alsafadi et al., 2023; Müller et al., 2021; Osei et al., 2023).

Selanjutnya, pada saat ini telah ada model the Community Earth System Model Large Ensemble (CESM-LE) yang dikembangkan oleh komunitas peneliti perubahan iklim. Model CESM-LE ini pada dasarnya menggunakan data masukan dari data CMIP5. Namun, model CESM-LE ini hadir untuk mengatasi kekurangan yang ada pada data CMIP5. Model CESM-LE ini terdiri dari beberapa model

seperti halnya model iklim *couple*. Model-model yang digunakan dalam model CEMS-LE di antaranya adalah model CAM5 untuk komponen atmosfer, model POP2 untuk komponen lautan, model CLM4 untuk komponen daratan, model CICE4 untuk komponen lapisan es, dan CPL7 sebagai *coupler*. Komponen model CEMS ini dapat dilihat pada Gambar 4.3. Jika ingin menggunakan data luaran dari model CEMS dapat diperoleh dengan mengakses laman <http://www.earthsystemgrid.org/>(Kay et al., 2015).



Sumber: Digambar ulang berdasarkan Kay et al. (2015)

Gambar 4.3 Komponen Model Iklim CEMS

Salah satu contoh sistem prediksi iklim yang telah dikembangkan saat ini adalah European Climate Prediction System dengan proyeknya yang bernama European Climate Prediciton (EUCP). Proyek ini dikerjakan bersama-sama oleh peneliti-peneliti di seluruh negara Eropa. EUCP memanfaatkan model iklim global yang diturunkan skalanya (*downscaling*) menjadi model regional khusus untuk wilayah Eropa. EUCP menghasilkan prediksi iklim dari skala tahunan hingga puluhan tahun. Walaupun begitu, proyek EUCP ini hanya berlangsung selama empat tahun sehingga mustahil untuk menjadi proyek yang

bersifat operasional. Namun, metode-metode dan hasil penelitian yang telah dipublikasikan berkat proyek EUCP bisa diadopsi dan dimanfaatkan oleh peneliti di seluruh dunia (Hewitt & Lowe, 2018). Contoh penerapan dari hasil proyek EUCP adalah Copernicus Climate Change Services (C3S). C3S merupakan sebuah sistem yang bersifat operasional menyediakan data prediksi iklim, data reanalisis iklim dan cuaca, serta data-data atmosfer lainnya dalam skala global. Data-data tersebut dapat diperoleh dengan gratis pada laman <https://climate.copernicus.eu/> (Buontempo et al., 2022). Pada situs web tersebut, kita perlu membuat akun terlebih dahulu untuk dapat mengakses data-data yang diperlukan. Tampilan dari situs web tersebut dapat kita lihat pada Gambar 4.4.



Sumber: Copernicus (2023)

Gambar 4.4 Tampilan Depan Laman Climate Change Service

H. Prediksi Iklim di Wilayah Tertentu dengan Metode *Statistical Downscaling*

Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, untuk menjalankan model iklim membutuhkan sumber daya komputasi yang tidak sedikit. Dengan teknologi saat ini, sumber daya komputasi masih menjadi barang mewah sehingga keterbatasan anggaran menjadi masalah ketika

ingin menjalankan model iklim secara utuh. Solusi untuk mengatasi masalah tersebut bisa dengan memperkecil domain model atau bisa juga dengan mengatur resolusi spasial dari model agar tidak terlalu tinggi. Memfokuskan domain model hanya di wilayah tertentu akan membuat perhitungan dari model menjadi lebih ringan dan cepat sehingga tidak membutuhkan sumber daya komputasi yang terlalu besar. Selain itu, apabila anggaran benar-benar terbatas sehingga hanya sedikit sumber daya komputasi yang dimiliki, kita bisa saja tidak menggunakan model dinamik untuk memprediksi iklim.

Pilihan lain selain menjalankan sendiri model iklim, kita bisa menggunakan data-data luaran model iklim yang telah tersedia secara gratis di internet. Contoh lain dari data luaran model iklim adalah data Climate Forecast System (CFS). Data CFS merupakan data prediksi iklim jangka pendek yang diproduksi oleh National Centers for Climate Prediction (NCEP) yang merupakan lembaga penelitian dari Amerika Serikat. Data CFS terbaru merupakan versi 2 dan memiliki beberapa jenis produk, di antaranya data operasional, data historis, dan data reanalisis. CFS operasional merupakan prediksi iklim hingga sembilan bulan ke depan dengan interval waktu per 6 jam atau bulanan dan resolusi spasial 0.5° atau sekitar 56 km. Parameter yang dihasilkan terdiri dari curah hujan, temperatur, tekanan, dan sebagainya (Saha et al., 2014). Untuk informasi lebih lanjut dan panduan pengunduhan data, dapat mengunjungi laman <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/climate-forecast-system>.

Setelah mengunduh data CFS yang dibutuhkan, langkah selanjutnya adalah melakukan teknik *downscaling* atau meningkatkan resolusi spasial dengan metode statistik. Metode statistik ini dipilih untuk mengatasi keterbatasan sumber daya komputasi yang dimiliki. Untuk bisa menggunakan teknik statistik *downscaling*, selain data CFS, kita juga membutuhkan *database* jangka panjang dari parameter yang ingin kita prediksi. Sebagai contoh, kita ingin memprediksi curah hujan dalam jangka waktu beberapa bulan ke depan maka kita harus menyiapkan *database* curah hujan jangka panjang untuk waktu ke belakang, misalkan 30 tahun sebelumnya. *Database* ini bisa berupa

data observasi titik atau spasial seperti dari observasi satelit. Database jangka panjang ini berguna untuk mengetahui pola curah hujan dalam jangka panjang di suatu wilayah. Dengan catatan, apabila menggunakan *database* berupa data spasial maka data tersebut harus memiliki resolusi spasial yang lebih tinggi dari data CFS. Metode statistik *downscaling* ada beberapa macam, tetapi metode yang sering digunakan adalah *bias correction* (Tabari et al., 2021) terutama untuk memprediksi curah hujan. Data CFS yang sudah ada akan diolah sedemikian rupa dan dicocokkan polanya dengan *database* yang sudah kita miliki sehingga nantinya akan dihasilkan data prediksi yang baru untuk wilayah tertentu yang telah dikoreksi. Metode ini dapat digunakan untuk berbagai macam keperluan yang membutuhkan informasi prediksi curah hujan jangka pendek dan menengah, seperti pertanian, pertambangan, dan bidang lainnya.

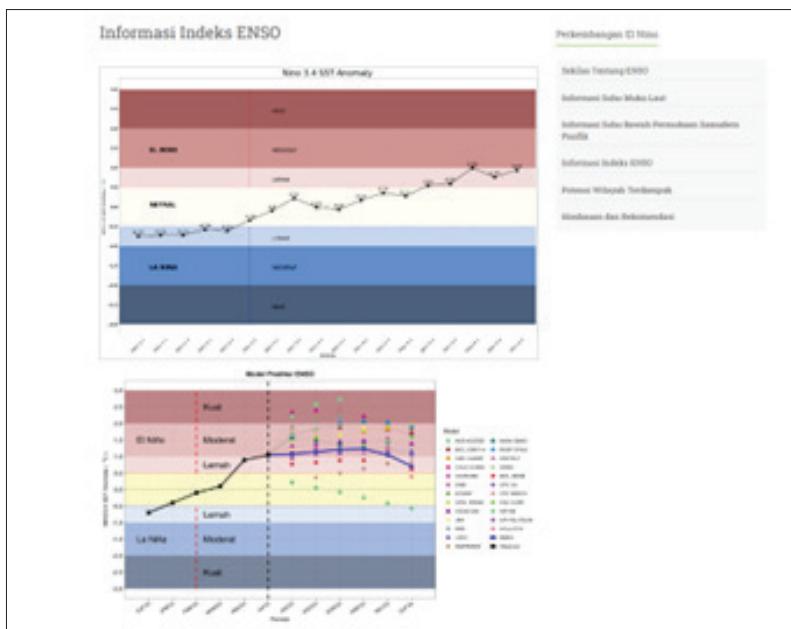
I. Ketidakpastian dalam Model Prediksi Iklim

Di pemaparan sebelumnya, sempat dibahas mengenai teori *chaos* di atmosfer yang dikemukakan oleh Lorenz pada tahun 1963. Teori *chaos* ini masih berlaku hingga sekarang bahwa atmosfer bumi itu bersifat *chaotic* atau kacau sehingga menimbulkan ketidakpastian dalam data luaran prediksi model, baik itu model cuaca maupun model iklim. Perbedaan data input sedikit saja akan menghasilkan luaran yang sangat berbeda. Untuk mengatasi ketidakpastian dari hasil luaran model, biasanya model akan dijalankan beberapa kali sehingga menghasilkan banyak sekali data. Banyaknya jumlah data luaran model ini nantinya akan digunakan untuk mengaplikasikan metode *ensemble*. Metode *ensemble* dimaksudkan untuk mencari peluang dari banyak data luaran model yang dihasilkan. Sebagai contoh kita memiliki data luaran model sebanyak sepuluh data. Sepuluh data ini sebut sebagai member *ensemble* yang mana data-data tersebut memiliki karakteristiknya masing-masing. Dari kesepuluh data tersebut akan dapat diperoleh peluang apakah pada waktu mendatang akan ada hujan atau tidak dan seberapa besar hujan yang akan terjadi. Dengan demikian, ketidakpastian dalam data luaran model dapat

diminimalisasi dan kita bisa lebih yakin ketika menggunakan data luaran model tersebut. Dengan adanya peluang suatu kejadian, kita bisa memiliki lebih banyak pilihan mitigasi atau penanganan yang bisa kita dilakukan sehingga keputusan akhir yang diambil merupakan yang terbaik.

Salah satu contoh aplikasi metode *ensemble* ini adalah pada saat memprediksi peluang terjadinya fenomena El Niño-Southern Oscillation (ENSO). ENSO merupakan fenomena anomali iklim global yang terjadi di Samudra Pasifik. ENSO memiliki dua fase, fase positif merupakan saat terjadinya El Niño dan fase negatif saat terjadinya La Niña. Kedua fase tersebut ketika terjadi sangat memengaruhi iklim di daerah sekitar Samudra Pasifik karena berdampak pada distribusi uap air yang merupakan bahan baku terbentuknya hujan. Dengan pengaruhnya terhadap curah hujan, akan berimplikasi pada sektor-sektor kehidupan manusia terutama sektor pangan yang sangat bergantung pada pola cuaca dan iklim. Oleh karena itu, untuk mengantisipasi kelangkaan pangan, prediksi fenomena ENSO merupakan hal yang sangat penting.

Prediksi fenomena ENSO dengan model iklim dapat dilihat pada situs web Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), yaitu <https://www.bmkg.go.id/iklim/indeks-enso.bmkg>. Tampilan prediksi ENSO tersebut dapat kita lihat pada Gambar 4.5.



Sumber: BMKG (2023)

Gambar 4.5 Informasi Prediksi Indeks ENSO pada Laman BMKG

Grafik kedua pada Gambar 4.5 menunjukkan hasil prediksi dari beberapa model ENSO hingga Februari 2024. BMKG menjalankan beberapa model untuk melihat prediksi suhu muka laut di Samudra Pasifik bagian timur atau lebih tepatnya wilayah NINO3.4. Kemudian suhu muka laut ini diolah menjadi indeks ENSO yang apabila menunjukkan nilai positif maka akan terjadi fenomena El Niño. Dari beberapa hasil prediksi tersebut kemudian diaplikasikan metode ensemble untuk melihat seberapa besar peluang terjadinya fase positif dan level kekuatannya. Karena sifat atmosfer yang chaos sehingga BMKG akan menjalankan model ini di setiap bulan untuk mengamati fluktuasi yang terjadi. Ada kemungkinan hasil prediksi akan berubah-ubah seiring berjalannya waktu.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

J. Prediksi Iklim di Indonesia

Prediksi iklim jangka panjang atau lebih dikenal sebagai proyeksi iklim secara resmi di Indonesia dilakukan oleh BMKG. Saat ini BMKG melalui laman resmi situs webnya telah secara operasional mengeluarkan prediksi iklim untuk jangka pendek, menengah, dan panjang. Untuk prediksi jangka panjang, BMKG menggunakan luaran model CORDEX-SEA ditambah dengan skenario kenaikan gas rumah kaca RCP4.5 dan RCP8.5. Model CORDEX-SEA ini dihasilkan dari *ensemble* enam model GCM. Hasil proyeksi yang dikeluarkan memiliki resolusi spasial 25 km untuk seluruh wilayah Indonesia dengan jangka waktu 2020–2049. Selain itu untuk kebutuhan resolusi tinggi di setiap pulau besar, BMKG menggunakan model GCM MIROC5 dengan skenario RPC4.5. Hasil yang dikeluarkan memiliki resolusi spasial 4 km (BMKG, t.t.). Hasil prediksi iklim yang dikeluarkan oleh BMKG dapat diakses melalui laman <https://www.bmkg.go.id/iklim/?p=proyeksi-perubahan-iklim>.

Prediksi iklim di Indonesia sejatinya masih menyisakan permasalahan dan tantangan besar. Pada dasarnya ketika kita menjalankan model atmosfer entah itu apa pun namanya, model tersebut merupakan produk atau pengembangan para ilmuwan yang berasal dari negara-negara lintang tinggi. Sejatinya model yang mereka kembangkan dibuat untuk wilayah di mana mereka tinggal atau dengan kata lain di wilayah lintang tinggi yang memiliki pola cuaca dan iklim yang berbeda dengan Indonesia. Model yang mereka kembangkan bisa berfungsi ketika domain kajiannya diubah ke wilayah Indonesia, tetapi menghasilkan *error* yang cukup besar dan sering kali keakuratannya belum memuaskan. Selain karena atmosfer memiliki sifat *chaotic*, pola iklim di Benua Maritim Indonesia sangat beragam. Benua Maritim Indonesia (BMI) memiliki belasan ribu pulau dari Sabang–Merauke. Kemudian BMI ini diapit oleh dua benua dan dua samudra yang tentunya menambah keragaman pola iklim di BMI.

Pola iklim di BMI dipengaruhi oleh fenomena-fenomena iklim global. Fenomena utama yang langsung memengaruhi iklim di BMI adalah angin monsun. Angin monsun terjadi dua kali dalam

setahun dengan perbedaan arah datangnya angin. Angin monsun ini diakibatkan pola revolusi bumi mengelilingi matahari dan kemiringan sumbu rotasi bumi. Pada musim Desember-Januari-Februari (DJF) akan bertiup angin monsun dari arah barat atau bisa disebut angin baratan. Pada periode DJF ini beberapa wilayah di Indonesia mengalami musim hujan karena banyaknya suplai uap air yang terbawa dari angin baratan. Lalu pada periode Juni-Juli-Agustus (JJA) terjadi angin monsun dari arah timur atau bisa disebut angin timuran. Pada periode ini beberapa wilayah Indonesia mengalami musim kemarau karena berkurangnya suplai uap air. Berkurangnya suplai uap air disebabkan angin timuran ini sebenarnya tetap membawa uap air, tetapi hanya langsung melewati wilayah Indonesia dan uap airnya yang turun hanya sedikit. Meskipun disebut sebagai fenomena utama, tetapi tidak semua wilayah Indonesia dipengaruhi oleh angin monsun ini. Beragamnya bentuk pulau dan kondisi topografi di BMI membuat ada beberapa wilayah memiliki pola iklim yang berbeda dengan pola monsun. Pola lain tersebut adalah pola anti monsun dan pola lokal. Pola iklim yang dipengaruhi oleh monsun ditandai dengan puncak musim hujan pada periode DJF, tetapi selain dari pola monsun puncak hujan terjadi di periode JJA atau periode lainnya.

Kemudian fenomena lainnya yang memengaruhi iklim di wilayah BMI adalah fenomena antartahunan, seperti ENSO yang telah disebutkan sebelumnya, dan Indian Ocean Dipole (IOD). Fenomena ENSO bisa terjadi antara 2–7 tahun sekali, sedangkan IOD sekitar 2 tahunan. Fenomena IOD ini mirip dengan fenomena ENSO, namun lokasi terjadinya di Samudra Hindia dan wilayah yang dipengaruhi langsung biasanya wilayah barat BMI, seperti Sumatra dan Jawa. Selain fenomena antartahunan ada juga fenomena di dalam musim yang dikenal sebagai Madden-Julian Oscillation (MJO). MJO merupakan fenomena menjalurnya gelombang atmosfer dari barat menuju timur dengan membawa uap air sehingga berpotensi terjadinya curah hujan di daerah yang dilewati oleh MJO. Fenomena ini berlangsung antara 30–90 hari sehingga disebut variasi di dalam musim.

Faktor lain yang memengaruhi pola iklim di BMI adalah siklus diurnal dan topografi. Sampai saat ini, model iklim global atau GCM

masih sulit untuk menangkap pola diurnal di wilayah BMI. Hal ini bisa disebabkan karena kurang representatifnya topografi yang digunakan oleh model. BMI memiliki kondisi topografi yang beraneka ragam mulai dari yang sederhana hingga yang kompleks seperti daerah pegunungan. Keragaman topografi ini menyebabkan terjadinya sirkulasi lokal seperti angin darat-angin laut dan angin gunung-angin lembah. Kedua sirkulasi lokal tersebut turut memengaruhi pola iklim di wilayah BMI (Yang et al., 2019). Untuk menghasilkan prediksi iklim yang realistik dengan kondisi sebenarnya di wilayah BMI, ukuran grid model pun turut menjadi permasalahan. Makin tinggi resolusi spasial atau ukuran grid yang digunakan maka hasil prediksi akan bisa lebih mendekati kondisi sebenarnya. Namun, peningkatan ukuran grid ini harus dibayar dengan sumber daya komputasi yang tidak sedikit juga.

Untuk menjalankan model iklim *couple* dengan resolusi tinggi untuk seluruh wilayah BMI saat ini masih terkendala dengan kesiapan infrastruktur High Performance Computer (HPC). Jumlah cores HPC yang dimiliki di Indonesia saat ini masih kalah dibandingkan negara-negara maju. Selain itu apabila kita ingin membangun model sendiri, tentunya membutuhkan sumber daya manusia yang tidak sedikit juga. Membangun model sendiri dari nol tentunya bukan pekerjaan mudah, akan dibutuhkan banyak waktu dan banyak sekali ahli yang terlibat seperti ahli matematika, komputasi, dan sains atmosfer. Oleh karena itu, kita masih bergantung pada model-model iklim global yang sudah ada sebelumnya. Walaupun begitu model-model iklim global tersebut masih sulit untuk menghasilkan prediksi iklim yang akurat di setiap waktu untuk di wilayah BMI terlebih saat musim basah karena banyaknya fenomena yang memengaruhi variabilitas iklim.

K. Peran Model dalam Prediksi Kondisi Iklim Global

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa variabilitas iklim di wilayah BMI sangat dipengaruhi beberapa fenomena iklim global. Fenomena-fenomena tersebut di antaranya adalah ENSO, IOD, MJO, dan Monsun. Model iklim sendiri dewasa ini telah mengalami banyak perkembangan dan digunakan oleh beberapa ilmuwan untuk

memprediksi kondisi iklim global pada masa depan. Penelitian dari Kitoh (2017) menyatakan bahwa CMIP memiliki performa yang baik dalam memprediksi fenomena Monsun Asia, terutama CMIP5. Hal ini memberikan harapan bahwa perkembangan model CMIP dapat memberikan prediksi lebih jauh dan lebih akurat mengenai Monsun Asia sehingga ke depan kondisi ekstrem terkait Monsun Asia ini dapat diantisipasi, mengingat Monsun Asia merupakan salah satu variabel iklim global yang sangat memengaruhi wilayah BMI. Hasil ini bahkan diperkuat dengan penelitian dari Babel et al. (2021) yang menyatakan bahwa baik model CMIP5 maupun CMIP6 sangat *robust* dalam memperkirakan kondisi *summer monsun* di Asia Tenggara. Perubahan iklim sendiri dipercaya ke depan akan banyak memengaruhi durasi dari perubahan angin dalam fenomena monsun. Hal ini berakibat pada durasi terjadinya musim kering atau musim hujan di sebuah wilayah (Moon & Ha, 2020).

Adapun beberapa fenomena iklim global yang memengaruhi kondisi iklim di BMI adalah fenomena *inter-annual*, seperti ENSO dan IOD. Kedua fenomena ini telah menyebabkan banyak kejadian ekstrem di Indonesia di antaranya kekeringan panjang yang menyebabkan masifnya kebakaran hutan pada tahun 2015 dan 2019, serta banjir dan longsor di banyak wilayah Indonesia pada tahun 2016. Pemahaman lebih mendalam dan prediksi yang akurat mengenai fenomena ini tentu dapat meningkatkan usaha adaptasi dan mitigasi dari dampak cuaca ekstrem akibat perubahan iklim, seperti kekeringan, kebakaran hutan, banjir, dan longsor. Penelitian mengenai performa model iklim dalam memprediksi ENSO dan IOD dilakukan oleh McKenna et al. (2020). Beliau menyatakan bahwa model iklim yang akurat dalam memperkirakan kondisi temperatur muka laut di daerah Samudra Hindia dapat membantu dalam memprediksi kejadian IOD. Kejadian IOD sendiri dipercaya memiliki kaitan yang erat dengan kejadian ENSO. CMIP5 dan CMIP6 sendiri mempunyai kemampuan yang mirip dalam memprediksi kondisi iklim ini. Arlindo sebagai kondisi yang sangat memengaruhi ENSO dan IOD juga dapat digambarkan dengan baik oleh CMIP5 (Santoso et al., 2022).

Qalbi et al. (2017) menggunakan CMIP5 dan memprediksi ke depan bahwa dalam kondisi El Niño dan IOD positif, curah hujan di Indonesia akan cenderung lebih kering dibandingkan data historis. Sebaliknya, dalam kondisi La Niña dan IOD negatif, curah hujan di Indonesia akan cenderung lebih basah dengan curah hujan mencapai 150–250 mm/bulan. Dalam kondisi normal, curah hujan di Indonesia cenderung akan lebih kering pada masa depan dibandingkan data historis.

L. Penutup

Berdasarkan pemaparan di atas, tentu banyak manfaat yang diperoleh dari mempelajari model iklim pada kehidupan sehari-hari terutama pada sektor pertanian. Model iklim dapat membantu para pemangku kebijakan untuk menyiapkan rencana jangka pendek, menengah, dan panjang untuk sektor pertanian agar tidak terjadi kelangkaan pangan. Namun, harus diakui bahwa model iklim saat ini masih memiliki beberapa kekurangan. Meskipun begitu, teknologi dan ilmu pengetahuan akan selalu berkembang dan makin maju. Begitu juga dengan perkembangan model iklim. Pada saat ini memang, akurasi prediksi iklim di BMI masih menjadi tantangan besar bagi para ilmuwan. Namun, bukan tidak mungkin suatu saat nanti akan ada model iklim yang lebih merepresentasikan kondisi iklim yang sebenarnya untuk wilayah BMI.

Referensi

- Alsfadi, K., Bi, S., Abdo, H. G., Almohamad, H., Alatrach, B., Srivastava, A. K., Al-Mutiry, M., Bal, S. K., Chandran, M. A. S., & Mohammed, S. (2023). Modeling the impacts of projected climate change on wheat crop suitability in semi-arid regions using the AHP-based weighted climatic suitability index and CMIP6. *Geoscience Letters*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40562-023-00273-y>
- Arakawa, A. (1997). *Interviewed by Paul N. Edwards (July 17-18, 1997)*. University of California.

- Berghorsson, P., Döös, B. R., Fryklund, S., Haug, O., & Lindquist, R. (1955). Routine forecasting with the barotropic model. *Tellus*, 7(2), 272–274.
- BMKG. (t.t.). Proyeksi Perubahan Iklim. BMKG. <https://www.bmkg.go.id/iklim/indeks-enso.bmkg>
- Bourke, W. (1974). A multi-level spectral model. I. Formulation and hemispheric integrations. *Mon. Wea. Rev.*, 102(10), 687-701.
- Buontempo, C., Burgess, S. N., Dee, D., Pinty, B., Thépaut, J. N., Rixen, M., Almond, S., Armstrong, D., Brookshaw, A., Lopez, A. A., Bell, B., Bergeron, C., Cagnazzo, C., Comyn-Plat, E., Damasio-Da-Costa, E., Guillory, A., Hersbach, H., Horányi, A., Nicolas, J., ... De Marcilla, J. G. (2022). The Copernicus climate change service climate science in action. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(12), E2669–E2687. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0315.1>
- Eliassen, E., Machenhauer, B., & Rasmussen, E. (1970). *On a numerical method for integration of the hydrodynamical equations with a spectral representation of the horizontal fields* (p. 35pp). Kobenhavns Universitet, Institut for Teoretisk Meteorologi.
- Goosse, H., Barriat, P. Y., Lefebvre, W., Loutre, M. F., & Zunz, V. (2008). *Introduction to climate dynamics and climate modelling*. <https://climate.envsci.rutgers.edu/climdyn2019/Goosse.pdf>
- Hewitt, C. D., & Lowe, J. A. (2018). Toward a European climate prediction system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(10), 1997–2001. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0022.1>
- Hurrell, J., Meehl, G. A., Bader, D., Delworth, T. L., Kirtman, B., & Wielicki, B. (2009). A unified modeling approach to climate system prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(12), 1819–1832. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS-2752.1>
- Institute of Meteorology, University of Stockholm (1954). Results of forecasting with the barotropic model on an electronic computer (BESK). *Tellus*, 6(2), 139–149.
- Johnson, D. R., & Arakawa, A. (1996). On the scientific contributions and insight of Professor Yale Mintz. *Journal of climate*, 9(12), 3211–3224.
- Kay, J. E., Deser, C., Phillips, A., Mai, A., Hannay, C., Strand, G., Arblaster, J. M., Bates, S. C., Danabasoglu, G., Edwards, J., Holland, M., Kushner, P., Lamarque, J. F., Lawrence, D., Lindsay, K., Middleton, A., Munoz, E., Neale, R., Oleson, K., ... Vertenstein, M. (2015). The community earth system model (CESM) large ensemble project : A community

- resource for studying climate change in the presence of internal climate variability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(8), 1333–1349. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00255.1>
- Khadka, D., Babel, M. S., Abatan, A. A., & Collins, M. (2021). An evaluation of CMIP5 and CMIP6 climate models in simulating summer rainfall in the Southeast Asian monsoon domain. *International Journal of Climatology*, 42(2), 1181–1202. <https://doi.org/10.1002/joc.7296>
- Kitoh, A. (2017). The Asian monsoon and its future change in climate models: A review. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 95(1), 7–33. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2017-002>
- Kurniadi, A., Weller, E., Kim, Y. H., & Min, S. K. (2022). Evaluation of Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 model-simulated extreme precipitation over Indonesia. *International Journal of Climatology*, 43(1), 174–196. <https://doi.org/10.1002/joc.7744>
- Langlois, W. E., & Kwok, H. C. W. (1969). *Description of the Mintz-Arakawa numerical general circulation model*. Department of Meteorology, University of California.
- Manabe, S. J., Smagorinsky, and R. F. Strickler (1965). Simulated climatology of general circulation with a hydrologic cycle. *Monthly Weather Rev.* 93, 769–798.
- Manabe, S. (1967). General circulation of the atmosphere. *Trans Am Geophys Union*, 48, 427-431.
- Manabe, S. (1970, Juni). The dependence of atmospheric temperature on the concentration of carbon dioxide. Dalam *Global effects of environmental pollution: A symposium Organized by the American Association for the Advancement of Science Held in Dallas, Texas, December 1968* (25–29). Springer.
- Manabe, S., Bryan, K., & Spelman, M. J. (1975). A global ocean-atmosphere climate model. Part I. The atmospheric circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 5(1), 3–29.
- McGuffie, K., & Henderson-Sellers, A. (2005). *A climate modelling primer*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0470857617>.
- Mintz, Y. (1958). Design of some numerical general circulation experiments. *Bull. Res. Council of Israel*, 76, 67–114.

- McKenna, S., Santoso, A., Gupta, A. S., Taschetto, A. S., & Cai, W. (2020). Indian Ocean Dipole in CMIP5 and CMIP6: characteristics, biases, and links to ENSO. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68268-9>
- Müller, C., Franke, J., Jägermeyr, J., Ruane, A. C., Elliott, J., Moyer, E., Heinke, J., Falloon, P. D., Folberth, C., Francois, L., Hank, T., Izaurrealde, R. C., Jacquemin, I., Liu, W., Olin, S., Pugh, T. A. M., Williams, K., & Zabel, F. (2021). Exploring uncertainties in global crop yield projections in a large ensemble of crop models and CMIP5 and CMIP6 climate scenarios. *Environmental Research Letters*, 16(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd8fc>
- Moon, S., & Ha, K. (2020). Future changes in monsoon duration and precipitation using CMIP6. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s41612-020-00151-w>
- Orszag, S. A. (1970). Transform method for the calculation of vector-coupled sums: Application to the spectral form of the vorticity equation. *Journal of Atmospheric Sciences*, 27(6), 890-895.
- Osei, E., Jafri, S. H., Saleh, A., Gassman, P. W., & Gallego, O. (2023). Simulated climate change impacts on corn and soybean yields in Buchanan County, Iowa. *Agriculture (Switzerland)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/agriculture13020268>
- Platzman, G. W. (1979). The ENIAC Computations of 1950-gateway to numerical weather prediction. *Bull. Am. Meteorolog. Soc.*, 60, 302–312.
- Qalbi, H. B., Faqih, A., & Hidayat, R. (2017). Future rainfall variability in Indonesia under different ENSO and IOD composites based on decadal predictions of CMIP5 datasets. *Dalam IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 54, Artikel 012043).. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/54/1/012043>
- Richardson, L. F. (1922). *Weather prediction by numerical process*. Cambridge University Press.
- Silberman, I. (1953). *Planetary waves in the atmosphere*. New York University.
- Smagorinsky, J. (1958). On the numerical integration of the primitive equations of motion for baroclinic flow in a closed region. *Monthly Weather Review*, 86(12), 457–466.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91(3), 99–164.

- Smagorjnsky, J. (1983). The beginnings of numerical weather prediction and general circulation modeling: early recollections. In *Advances in geophysics* (Vol. 25, 3–37). Elsevier.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y. T., Chuang, H. Y., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., Van Den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., & Becker, E. (2014). The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, 27(6), 2185–2208. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>
- Santoso, A., England, M. H., Kajtar, J. B., & Cai, W. (2022). Indonesian throughflow variability and linkage to ENSO and IOD in an ensemble of CMIP5 models. *Journal of Climate*, 35(10), 3161–3178. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0485.1>
- Tabari, H., Paz, S. M., Buekenhout, D., & Willems, P. (2021). Comparison of statistical downscaling methods for climate change impact analysis on precipitation-driven drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(6), 3493–3517. <https://doi.org/10.5194/hess-25-3493-2021>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Yang, S., Zhang, T., Li, Z., & Dong, S. (2019). Climate variability over the maritime continent and its role in global climate variation: A review. *Journal of Meteorological Research*, 33(6), 993–1015. <https://doi.org/10.1007/S-13351-019-9025-x>

BAB V

Perkembangan Metode Prediksi Iklim untuk Menunjang Ketahanan Pangan

Suciantini, Elza Surmaini, Yayan Apriyana, Erni Susanti, Misnawati, Yudi Riadi Fanggidae

A. Pentingnya Informasi Prediksi Iklim untuk Ketahanan Pangan

Perubahan iklim merupakan salah satu isu global yang sering dibicarakan dewasa ini. Dalam beberapa tahun terakhir, perubahan iklim yang terjadi makin cepat dan makin tidak terduga (Hansen et al., 2023). Pertanian merupakan salah satu sektor yang paling terdampak perubahan iklim akibat berubahnya ketersediaan air, suhu dan kelembapan udara, serta pada peningkatan risiko serangan hama dan penyakit tanaman yang dapat menyebabkan penurunan hasil, mengganggu ketersediaan dan kualitas bahan pangan (Surmaini, 2016; Sari & Sari, 2022), sebagaimana telah diulas dalam Bab II. Untuk mengatasi dampak perubahan iklim tersebut, diperlukan inovasi

Suciantini, E. Surmaini, Y. Apriyana, E. Susanti, Misnawati, & Y. R. Fanggidae
Badan Riset dan Inovasi Nasional, e-mail: suci022@brin.go.id

© 2024 Editor & Penulis

Suciantini, Surmaini, E., Apriyana, Y., Susanti, E., Misnawati, & Fanggidae, Y. R. (2024). Perkembangan metode prediksi iklim untuk menunjang ketahanan pangan. Dalam D. E. Nuryanto & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (119–158). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1244.c1389.
E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

adaptasi yang dapat memberikan solusi, dengan tujuan memaksimalkan dampak positif perubahan iklim dan mengurangi dampak negatifnya (Perdinan et al., 2019; Dariah & Surmaini, 2019).

Informasi prediksi iklim merupakan salah satu aspek adaptasi yang penting dalam perencanaan pertanian yang adaptif. Prediksi iklim memberikan perkiraan probabilitas variabel iklim pada masa depan, seperti kondisi suhu, curah hujan, intensitas radiasi, angin, kelembapan, tutupan awan, tinggi muka laut, dan peristiwa iklim ekstrem. Prediksi iklim merupakan upaya yang kompleks yang memerlukan komputasi berkinerja tinggi (*high-performance computing*) untuk melakukan manajemen data dalam skala besar, melakukan perhitungan statistik maupun dinamik, dan kolaborasi antarmodel.

Seiring dengan perkembangan teknologi komputasi, metode prediksi iklim terus mengalami pengembangan oleh berbagai lembaga prediksi dunia. World Meteorological Organization (WMO) melalui WMO Global Data Processing and Forecasting System (GDPFS) mengoordinasi 17 institusi yang bertanggung jawab untuk mengeluarkan dan mengembangkan informasi prediksi iklim secara global. Beberapa lembaga internasional menyediakan prediksi iklim untuk skala regional, di antaranya International Research Institute (IRI), Bureau of Meteorology (BoM), National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA), National Aeronautics and Space Administration (NASA), European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) dan Predictive Ocean Atmosphere Model for Australia (POAMA). Pada tataran nasional, informasi prediksi iklim untuk seluruh wilayah Indonesia disediakan oleh Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). BMKG menyajikan prediksi iklim berbasis Zona Musim (ZOM). Prediksi iklim yang disediakan BMKG terdiri dari Prakiraan Awal Musim (Awal Musim Hujan dan Musim Kemarau), Perbandingan Prakiraan Awal Musim Terhadap Normal, dan Prakiraan Sifat Hujan (<https://www.bmkg.go.id/iklim/prakiraan-musim.bmkg>).

Prediksi iklim dapat dimanfaatkan dengan analisis lanjut menjadi model dampak, seperti prediksi kekeringan dan banjir, ketersediaan sumber daya air, termasuk serangan hama dan penyakit

tanaman. Contohnya, Surmaini et al. (2015) mengkaji pemanfaatan model prediksi musim dari NOAA Climate Forecast System version 2 (CFSv2) untuk memprediksi curah hujan dengan metode *downscaling* Constructed Analogue (CA). Hasil *downscaling* curah hujan tersebut digunakan untuk input prediksi risiko kekeringan tanaman padi di Indonesia. Namun, pemanfaatan teknologi prediksi iklim dalam sektor pertanian masih perlu ditingkatkan. Beberapa faktor yang menyebabkan masih kurangnya implementasi pada tingkat pengguna, di antaranya kurangnya pemahaman mengenai manfaat informasi prediksi, aksesibilitas yang masih rendah, dan masalah keterbatasan sumber daya.

Sebagai negara tropis yang memiliki dua musim, yaitu musim hujan dan musim kemarau, prediksi musim merupakan hal yang sangat penting terutama untuk sektor pertanian. Metode prediksi musim telah berkembang dan mengalami kemajuan yang signifikan sehingga memungkinkan untuk melakukan prediksi jangka panjang. Prediksi musim dipercaya memiliki potensi yang sangat besar untuk bisa membantu pengambilan kebijakan pada sektor pertanian. Informasi prediksi diperlukan oleh pengambil kebijakan dalam perencanaan sarana dan prasarana pertanian pada musim tanam yang akan datang (Surmaini & Agus, 2020). Informasi prediksi musim yang akurat diperlukan petani sebagai acuan untuk mengambil tindakan yang tepat dalam praktik budi daya, seperti pemilihan komoditas dan varietas, penyesuaian jadwal tanam dan panen, serta penyesuaian pola tanam sehingga dapat mengurangi risiko kerugian akibat perubahan iklim (Susanti et al., 2018).

Bahasan dalam bab ini diharapkan dapat digunakan meningkatkan pemahaman pengguna tentang pentingnya prediksi iklim dalam sektor pertanian khususnya pada tanaman pangan. Pada bagian awal bab ini disampaikan ulasan singkat mengenai iklim dan kondisi pangan di Indonesia, yang mengilustrasikan variabilitas iklim di Indonesia dan dampak perubahan iklim terhadap produksi pangan. Bagian berikutnya mengulas kontribusi prediksi iklim dalam mengatasi dampak perubahan iklim terhadap ketahanan pangan serta

kendala pemanfaatan prediksi iklim di sektor pangan. Hal tersebut kemudian diikuti oleh bahasan konsep dasar teknologi prediksi musim, metode prediksi musim, dan perkembangan metode prediksi musim yang terjadi di Indonesia, yang semuanya mengarah pada perbaikan akurasi dan resolusi data hasil prediksi. Untuk memberi gambaran yang lebih utuh, dalam bab ini juga disampaikan studi kasus mengenai penggunaan prediksi iklim untuk mendukung ketahanan pangan.

B. Iklim dan Kondisi Pangan di Indonesia

Secara astronomis, Indonesia terletak di antara 6°LU–11°LS dan 95°BT–141°BT. Dengan posisi yang berada di garis ekuator, Indonesia mendapatkan sinar matahari yang relatif konstan sepanjang tahun, beriklim tropis, dengan suhu rata-rata bulanan berkisar antara 25°C–26°C, serta memiliki curah hujan dan tingkat kelembapan yang tinggi (Aldrian & Susanto, 2003; Yuan et al., 2011; Winarno et al., 2019; Asian Development Bank, 2021). Curah hujan tersebut menjadi indikator musim di Indonesia, yakni musim hujan dan musim kemarau. Musim di Indonesia berkaitan dengan gerak semu matahari yang menyebabkan adanya angin monsun yang berganti arah secara periodik setiap enam bulan sekali. Pada saat posisi matahari di sebelah selatan ekuator, tekanan udara di selatan menjadi lebih rendah dibandingkan di utara ekuator, angin monsun barat yang bertiup dari Asia ke Australia pada bulan Oktober–Maret membawa sejumlah besar uap air, yang memicu musim hujan di sebagian besar wilayah Indonesia (Pandia et al., 2019). Sebaliknya, ketika matahari di utara ekuator, tekanan di utara menjadi lebih rendah dibandingkan di selatan ekuator, angin monsun timur yang bertiup dari Australia ke Asia antara bulan April–September membawa udara kering, menyebabkan musim kemarau. Dengan demikian, wilayah Indonesia yang terpengaruh oleh angin monsun memiliki musim hujan (MH) dan musim kemarau (MK) yang jelas.

Indonesia juga merupakan negara kepulauan dan memiliki topografi yang beragam. Interaksi laut, atmosfer, dan daratan secara lokal menyebabkan adanya variasi curah hujan yang berbeda antarwilayah. Selain itu, posisi geografis Indonesia yang berada di antara Samudra

Hindia dan Samudra Pasifik juga menyebabkan adanya kompleksitas dinamika atmosfer dan gangguan terhadap pola musim maupun pola parameter-parameter iklim lainnya. Variabilitas Indian Ocean Dipole (IOD) di Samudra Hindia dan El Niño-Southern Oscillation (ENSO) di Pasifik (Surmaini & Faqih, 2016) umumnya menyebabkan gangguan pada siklus iklim dalam periode tertentu sehingga parameter iklim mengalami pergeseran atau perubahan, seperti peningkatan atau penurunan intensitas hujan. Variabilitas ini terjadi akibat adanya penyimpangan pada Suhu Permukaan Laut (SPL) Samudra Pasifik maupun Samudra Hindia yang memengaruhi sirkulasi sistem atmosfer global dan berdampak pada sistem iklim regional, termasuk di wilayah Indonesia. Penyimpangan atau anomali iklim pada suatu wilayah yang memengaruhi sirkulasi global dan saling terkait—berdampak pada sistem iklim regional di wilayah tertentu ini sering disebut dengan istilah telekoneksi.

ENSO (El Niño dan La Niña) di Samudra Pasifik dan IOD di Samudra Hindia merupakan faktor paling penting yang secara signifikan memengaruhi variabilitas curah hujan di Indonesia (Apriyana et al., 2021; Kusfirdianti & Wiratmo, 2022). Kejadian El Niño di Indonesia dirasakan dengan penurunan curah hujan, sebaliknya La Niña dirasakan dengan kenaikan curah hujan. IOD positif berasosiasi dengan peningkatan kejadian kekeringan di Indonesia, khususnya di wilayah bagian barat, sedangkan IOD negatif berkaitan dengan peningkatan frekuensi dan intensitas curah hujan ekstrem. Kejadian IOD yang bersamaan dengan ENSO dapat memperparah kejadian iklim ekstrem, seperti yang terjadi pada saat El Niño tahun 1997 atau 1998 yang berbarengan dengan kejadian IOD positif. Hubungan antara IOD dan ENSO dapat saling menguatkan atau saling melemahkan. Fenomena ENSO sangat kuat memengaruhi daerah Indonesia bagian selatan.

Selain ENSO dan IOD, fenomena lain yang memiliki pengaruh besar terhadap variabilitas iklim di Indonesia adalah Madden-Julian Oscillation (MJO), dan Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BS-ISO) (Surmaini & Faqih, 2016). MJO merupakan aktivitas gelombang

atmosfer intra seasonal yang terjadi di wilayah tropis, yang dapat dikenali dari pergerakan aktivitas konveksi yang bergerak ke arah timur dari Samudra Hindia ke Samudra Pasifik. Pada umumnya muncul setiap 30 sampai 40 hari. Model osilasi dominan MJO membawa massa udara basah di daerah tropik yang dapat menyebabkan curah hujan ekstrem. MJO sangat kuat dampaknya dirasakan di daerah dekat garis ekuator. Sementara itu, BSISO adalah variabilitas iklim yang dihasilkan dari interaksi laut dan atmosfer dengan arah pergerakan dari Samudra Hindia ke barat laut Samudra Pasifik yang juga memengaruhi iklim di Indonesia. Menurut Faqih dan Nurussyifa (2017), BSISO dapat menyebabkan kejadian hujan ekstrem di sekitar wilayah Sumatra Utara–Kalimantan terutama selama bulan Mei–Oktober. BSISO umumnya dominan aktif pada saat musim panas di Bumi Belahan Utara (BBU) khususnya di Asia sehingga disebut *boreal summer*. Dikatakan *intraseasonal oscillation* karena BSISO memiliki skala waktu 30–60 hari dan dua mingguan.

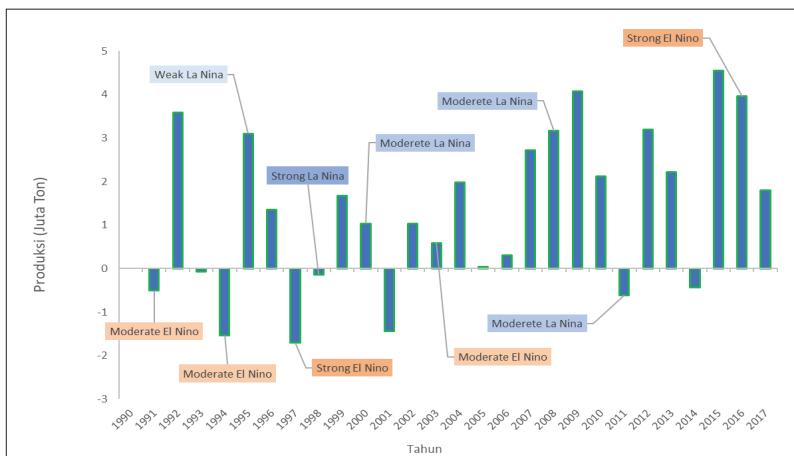
Ditengah kompleksitas dinamika atmosfer yang memengaruhi variabilitas iklim, Indonesia juga harus menghadapi perubahan iklim. Perubahan iklim merupakan kondisi berubahnya intensitas dan pola unsur-unsur iklim pada suatu wilayah dalam jangka waktu yang panjang, atau secara teknis disebutkan sebagai tren berubahnya pola dan penyebaran kondisi cuaca rata-rata atau variasinya dalam jangka waktu tertentu, umumnya ketika dibandingkan kondisi klimatologis 30 tahun (WMO, 2007; Arguez & Vose, 2011; Gulev et al., 2021). Perubahan iklim terjadi ketika sistem iklim (interaksi antara atmosfer, laut, lapisan es, daratan, termasuk juga makhluk hidup) mengalami kecenderungan berubah dan menghasilkan pola cuaca baru yang bertahan setidaknya dalam satu dekade atau lebih. Perubahan yang terjadi dapat berupa perubahan pada intensitas, frekuensi kejadian, maupun durasi dari berbagai parameter-parameter iklim. Contoh-contoh perubahan iklim, yaitu kecenderungan meningkat atau berkurangnya curah hujan maupun hari hujan atau hari tanpa hujan, bergesernya awal musim (Dore, 2005), berubahnya suhu udara harian, termasuk perubahan pada variasi suhu harian (Braganza et al., 2004).

Iklim bumi telah mengalami berbagai perubahan selama jutaan tahun, tetapi laju perubahannya telah mengalami peningkatan secara pesat dalam beberapa dekade terakhir akibat dari aktivitas manusia (Lynas et al., 2021). Aktivitas yang dimaksud adalah kegiatan manusia yang mengemisikan gas rumah kaca ke atmosfer sehingga memerangkap panas dan menyebabkan bumi menjadi hangat atau yang disebut dengan pemanasan global (WMO, 2021). Pemanasan global menyebabkan perubahan pada interaksi sistem iklim di bumi yang mengakibatkan perubahan iklim dengan dampak berbeda-beda pada setiap wilayah (Arnell et al., 2019; Ranasinghe et al., 2021).

Pemanasan global berpengaruh juga terhadap variabilitas iklim. Meskipun belum ada konsensus dari model-model iklim terkait hubungan kausalitas antara pemanasan global terhadap variasi suhu muka laut ENSO ataupun IOD (Pendergrass et al., 2017), variabilitas curah hujan pada wilayah yang terpengaruh ENSO dan IOD diproyeksikan akan makin meningkat (IPCC, 2021). Hal ini berkaitan dengan kondisi termodinamika atmosfer yang berubah karena meningkatnya suhu dan kelembapan atmosfer, sejalan dengan makin meningkatnya badai tropis. Hal ini berpengaruh pada variasi curah hujan, pola musim (bergesernya awal musim), dan meningkatnya kejadian iklim ekstrem di wilayah Indonesia (Naylor et al., 2007).

Iklim ekstrem merupakan kejadian yang jarang terjadi dengan nilai intensitas melewati ambang batas atas atau bawah dari suatu unsur iklim, secara statistik didefinisikan berada di bawah persentil 10 atau di atas persentil 90 dari sebaran probabilitas rata-rata kondisi klimatologi (IPCC, 2022). Iklim ekstrem juga dapat dilihat dari dampak yang ditimbulkan, yaitu kejadian iklim dengan potensi kerugian yang besar pada lingkungan dan masyarakat, seperti curah hujan yang sangat tinggi, durasi hari tanpa hujan yang panjang, angin kencang, dan suhu udara tinggi. Secara praktis kejadian iklim ekstrem sebagai dampak perubahan iklim pada sektor pertanian dapat disederhanakan pada kejadian banjir, kekeringan, termasuk juga dengan ledakan hama dan penyakit tanaman (organisme pengganggu tanaman, OPT).

Kejadian banjir, kekeringan, dan serangan OPT secara langsung dapat menurunkan produksi pangan bahkan gagal panen (puso). Sementara itu, pergeseran awal musim yang tidak diikuti dengan penyesuaian musim tanam dapat menurunkan kualitas produksi pangan. Pada sisi yang lain, peningkatan suhu udara rata-rata akan berpengaruh pada metabolisme tanaman yang secara fisiologis berdampak pada terhambatnya pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Liu et al., 2017). Hal ini menunjukkan besarnya dampak perubahan iklim terhadap produksi pangan di Indonesia. Sebagai contoh, kejadian iklim ekstrem El Niño dan La Niña berdampak terhadap dinamika produksi padi. Kejadian El Niño menyebabkan penurunan produksi padi nasional bervariasi tergantung intensitasnya berkisar antara 100 ribu–1,7 juta ton (Gambar 5.1).



Sumber: Modifikasi dari Aldrian et al. (2022)

Gambar 5.1 Anomali Produksi Padi Nasional Periode 1990–2017

Berbeda dengan El Niño, kejadian La Niña tahun 2011 menyebabkan terjadinya kenaikan produksi padi, namun sebaliknya terjadi penurunan produksi pada tanaman jagung yang tidak memerlukan lahan basah (Utami et al., 2011). Peristiwa La Niña tahun 2005 (La Niña lemah) dan 2010 (La Niña kuat) berdampak terhadap pening-

katan produksi padi di Banten masing-masing sebesar 2,62% (45.726 ton) dan 1,33% (25.898 ton) dari kondisi netral (Mulyaqin, 2020).

Kerusakan tanaman pertanian di Indonesia sangat terkait dengan puso (gagal panen) akibat banjir dan kekeringan. Data dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB, 2023) menunjukkan bahwa selama periode 2014–2023 terjadi 8110 kejadian bencana banjir dan 376 kejadian kekeringan. Data Kementerian Pertanian menunjukkan bahwa luas kerusakan tanaman padi di lahan sawah yang terkena kekeringan pada tahun El Niño rata-rata sekitar 450.000 ha, dengan luasan tertinggi mencapai lebih dari 860.000 ha. Kerusakan tanaman padi di lahan sawah akibat tergenang banjir pada tahun La Niña mencapai 311.000 Ha (Subagyono et al., 2022).

Adanya beberapa dampak tersebut menyebabkan ketidakstabilan pasokan pangan, peningkatan harga pangan, dan risiko kelaparan yang lebih tinggi. Upaya adaptasi dan mitigasi perubahan iklim pada sektor pertanian yang berkelanjutan menjadi penting untuk menghadapi tantangan pada masa mendatang. Bentuk-bentuk adaptasi dan mitigasi yang dapat dilakukan tentunya harus didasarkan pada data dengan validitas dan reliabilitas yang baik, termasuk data prediksi iklim. Selain itu, transformasi inovasi teknologi merupakan pendorong penting pertumbuhan pertanian pada masa yang akan datang, termasuk peningkatan penggunaan varietas tanaman, mesin pertanian, dan reformasi lahan/kelembagaan (Sutardi et al., 2023).

C. Peranan Prediksi Iklim dalam Ketahanan Pangan

Kontribusi prediksi iklim dalam mengatasi dampak perubahan iklim terhadap ketahanan pangan dapat dilakukan melalui perencanaan dan pengelolaan pertanian yang dapat membantu petani, pengelolaan lahan, dan kebijakan pertanian dalam merencanakan dan mengelola sistem pertanian. Informasi iklim jangka pendek dan jangka panjang membantu dalam menentukan waktu penanaman, irigasi, pengendalian hama dan penyakit, serta pemilihan varietas tanaman yang tahan terhadap kondisi iklim yang berubah. Dengan menggunakan prediksi iklim, dapat membuat keputusan yang lebih

baik tentang pengelolaan air, termasuk alokasi air yang tepat, penggunaan teknologi irigasi yang efisien, dan penyesuaian pola tanam untuk mengurangi dampak kekeringan atau banjir (Zhao et al., 2022). Prediksi iklim memainkan peran penting dalam mengurangi risiko bencana terkait iklim, seperti banjir, kekeringan, serangan OPT atau gelombang panas yang ekstrem. Dengan memprediksi dan memantau pola iklim yang tidak biasa, masyarakat dapat mengambil tindakan pencegahan yang diperlukan, seperti evakuasi dini, peningkatan infrastruktur tahan bencana, dan perencanaan darurat. Prediksi iklim dapat membantu dalam mengembangkan strategi diversifikasi pangan yang sesuai dengan kondisi iklim yang berubah. Informasi tentang perubahan suhu, curah hujan, dan musim tumbuh yang diharapkan memungkinkan petani dan produsen pangan untuk menyesuaikan sistem produksi mereka dan beralih ke tanaman atau teknik pertanian yang lebih sesuai dengan kondisi baru (Rahman, 2018).

Berdasarkan skala waktu prediksi, BMKG mengeluarkan tiga jenis produk informasi prediksi iklim. Prediksi iklim jangka pendek, yaitu prediksi dasarian (10 harian), prediksi iklim menengah, yaitu prediksi iklim bulanan, dan prediksi jangka panjang, yaitu prediksi musim. Dalam konteks perencanaan pertanian prediksi jangka panjang (3–6 bulan ke depan) atau yang dikenal juga dengan prediksi musim menjadi sangat penting. Prediksi musim dapat digunakan antara lain untuk perencanaan tanam dan pemilihan komoditas. Prediksi submusim mempunyai jangka waktu yang lebih pendek 1–2 bulan ke depan yang dapat dimanfaatkan untuk perencanaan teknis budi daya, seperti waktu pemupukan, aplikasi pestisida, penjadwalan irigasi, dan pengeringan.

Para petani perlu terbiasa memantau prediksi musim sebelum melakukan aktivitas pertanian, mereka juga harus mampu beradaptasi dengan menyesuaikan pola tanam, mengubah budi daya pertanian, dan menjadi lebih fleksibel dalam memilih varietas tanaman yang sesuai dengan kondisi iklim. Selain itu, penggunaan teknologi dalam bidang pertanian juga dapat membantu meningkatkan ketahanan terhadap kondisi iklim ekstrem. Misalnya, di wilayah dengan pe-

ningkatan intensitas curah hujan namun mengalami juga peningkatan panjang hari tanpa hujan, petani dapat menerapkan pemanenan air selama musim hujan untuk digunakan saat musim kemarau. Penggunaan pompa air juga dapat menjadi solusi di wilayah yang mengalami kesulitan pasokan air, walaupun penggunaan pompa air harus dilakukan dengan kajian yang ketat dan memperhatikan prinsip keberlanjutan. Selain itu, penggunaan mulsa atau naungan, baik alami maupun buatan, dapat digunakan untuk mengatasi perubahan intensitas radiasi yang disebabkan oleh perubahan iklim.

Peran pemerintah sangat penting dalam menyediakan informasi prediksi iklim yang dapat diandalkan dan akurat. Pemerintah harus memprioritaskan kajian ilmiah dalam bidang hubungan iklim dan pertanian, baik itu untuk prediksi iklim musiman, proyeksi iklim pada masa depan, strategi adaptasi dan mitigasi, maupun pengembangan teknologi pertanian. Informasi yang handal dapat membantu petani dan pemangku kepentingan lainnya dalam mengambil keputusan yang lebih baik dalam menghadapi perubahan iklim (Rahman, 2018). Selain itu, pemerintah juga dapat berperan dalam membentuk kebijakan yang mendukung ketahanan pangan dalam menghadapi perubahan iklim. Kebijakan ini dapat mencakup insentif bagi petani yang menerapkan praktik pertanian yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, pendidikan dan pelatihan untuk petani dalam hal adaptasi dan mitigasi perubahan iklim, serta pengembangan infrastruktur yang mendukung ketahanan pangan, seperti sistem irigasi yang efisien dan pemeliharaan pasokan air yang berkelanjutan.

Inilah mengapa prediksi iklim menjadi sangat penting untuk mendukung ketahanan pangan. Dengan memperoleh informasi yang akurat tentang proyeksi iklim pada masa depan, kita dapat memperkirakan peluang produktivitas pertanian, mengidentifikasi risiko dan tantangan yang akan dihadapi, serta merancang upaya adaptasi dan mitigasi yang diperlukan. Penting untuk diingat bahwa dampak perubahan iklim dapat bervariasi antara wilayah yang satu dengan yang lain. Oleh karena itu, prediksi iklim dapat membantu pengambilan keputusan dalam merancang strategi adaptasi dan

mitigasi yang sesuai, terutama bagi wilayah yang diperkirakan akan mengalami dampak yang signifikan akibat perubahan iklim.

Pada saat ini, telah banyak prediksi iklim untuk wilayah Indonesia, baik data resmi yang dikeluarkan oleh BMKG, maupun hasil menjalankan model-model iklim oleh instansi lainnya di dalam maupun luar negeri. Namun, pemanfaatan prediksi iklim di sektor pangan dapat menghadapi beberapa kendala, antara lain, sebagai berikut.

- 1) Tingkat ketidakpastian dalam prediksi iklim jangka panjang yang inheren disebabkan faktor-faktor, seperti perubahan iklim yang kompleks dan banyaknya variabel yang harus dipertimbangkan.
- 2) Kebutuhan informasi iklim dapat berbeda antara wilayah geografis dan antara musim tanam yang berbeda, baik secara spasial maupun temporal, sehingga perlu memiliki model prediksi iklim yang mampu memberikan informasi yang tepat pada skala yang sesuai dengan kebutuhan sektor pangan.
- 3) Kurangnya stasiun pemantauan cuaca, minimnya komputasi yang kuat untuk memproses data prediksi iklim, data historis yang kurang lengkap, serta keterbatasan akses pada teknologi pemantauan iklim merupakan faktor-faktor yang menghambat pengembangan prediksi iklim secara akurat.

Meskipun terdapat beberapa kendala, prediksi iklim masih dapat memberikan manfaat signifikan, dan selanjutnya diperlukan langkah-langkah konkret yang dapat memperkuat pemanfaatan prediksi iklim di sektor pangan dengan terus meningkatkan akurasi model prediksi menjadi lebih baik. Kebutuhan terhadap informasi iklim antarwilayah dan musim tanam yang berbeda merupakan alasan penting untuk mengembangkan model prediksi iklim yang dapat disesuaikan dengan skala yang relevan. Dalam hal ini, penggunaan teknik *downscaling* dapat menjadi solusi dalam memberikan informasi yang lebih detail dan sesuai dengan kebutuhan sektor pangan dari informasi skala global. Namun, perlu transparansi informasi terkait tingkat akurasi model prediksi hasil *downscaling* secara spasial sehingga pengguna

dapat mengukur sejauh mana tingkat keandalan prediksi tersebut. Lebih lanjut mengenai *downscaling* prediksi iklim akan dijelaskan pada subbab selanjutnya.

Perlu juga diperhatikan bahwa pengembangan prediksi iklim yang lebih baik membutuhkan data yang berkualitas dan lengkap. Oleh karena itu, upaya untuk memperbanyak jaringan stasiun pengamatan cuaca sangatlah penting. Data observasi yang berkualitas menjadi dasar yang kuat untuk mengembangkan model prediksi yang akurat dan dapat diandalkan. Dalam konteks sektor pangan, data observasi sangat diperlukan dalam menganalisis hubungan iklim dengan pertumbuhan, produksi, termasuk kerusakan yang ditimbulkan. Hubungan iklim dan tanaman yang diperoleh dapat menjadi dasar dalam membangun model simulasi tanaman sehingga berdasarkan informasi prediksi iklim dapat disiapkan langkah adaptasi dan mitigasi yang spesifik.

Kendala lain dalam pemanfaatan informasi iklim adalah kapasitas petani dan penyuluh pertanian dalam mengakses dan menginterpretasikan informasi prediksi iklim. Petani berada di garis depan produksi pangan dan mereka memiliki wawasan mendalam tentang kondisi lokal, praktik pertanian, serta tantangan lapangan yang dihadapi. Penyuluh pertanian di sisi lain memiliki peran penting sebagai perantara antara informasi ilmiah dan praktik pertanian di lapangan. Persepsi petani terkait iklim maupun bencana yang berkaitan dengan iklim akan sangat menentukan langkah adaptasi maupun mitigasi terutama dalam mendukung ketahanan pangan (Fanggidae et al., 2021). Dengan pemahaman mengenai persepsi petani, penyuluh pertanian dapat memberikan panduan yang lebih akurat kepada petani dalam menerjemahkan informasi prediksi iklim menjadi langkah-langkah konkret yang dapat diambil dalam menghadapi risiko perubahan iklim.

Peningkatan kapasitas penyuluh dan petani dalam memahami serta menginterpretasikan informasi prediksi iklim dapat diwujudkan melalui serangkaian pelatihan dan pendidikan yang terstruktur. Petani dan penyuluh pertanian perlu diberikan pengetahuan yang lebih

dalam tentang konsep dasar iklim, metode prediksi, dan bagaimana informasi tersebut dapat diaplikasikan dalam konteks pertanian. Salah satu contoh suksesnya adalah program Sekolah Lapang Iklim (SLI). SLI adalah kegiatan literasi iklim untuk mendukung ketahanan pangan dalam rangka adaptasi perubahan iklim yang dilakukan BMKG dengan berkolaborasi dengan Kementerian Pertanian, pemerintah daerah, dan organisasi kemasyarakatan lainnya. Program seperti ini perlu untuk terus ditingkatkan dan diperluas. Dengan meningkatnya kualitas penyuluh dan petani dalam memahami prediksi iklim maka akan terjadi peningkatan dalam kesiapan menghadapi variasi iklim yang berpeluang terjadi. Petani akan dapat merencanakan tindakan yang lebih efektif, seperti penjadwalan tanam yang lebih tepat waktu atau penggunaan teknik pertanian yang lebih adaptif. Risiko kerugian akibat kejadian cuaca ekstrem juga dapat dikelola dengan lebih baik, mengurangi potensi kerugian finansial dan produktivitas. Pada akhirnya kualitas dan kuantitas hasil panen dapat ditingkatkan, berkontribusi pada ketahanan pangan yang lebih baik dalam jangka panjang.

D. Teknologi Prediksi Musim untuk Pertanian

1. Konsep Dasar Teknologi Prediksi Musim

Prediksi iklim jangka panjang atau dikenal juga dengan istilah prediksi musim (*seasonal prediction*) merupakan bagian penting dari prediksi iklim. Berbeda dengan prediksi cuaca harian, prediksi musim memberikan prakiraan anomali bulanan atau musiman dari kondisi klimatologis pada periode tersebut. Prakiraan musiman menjadi bagian penting dalam antisipasi risiko iklim karena mempunyai waktu yang memadai untuk pengambilan keputusan dan mempersiapkan sarana dan prasarana untuk antisipasi (Hewitt et al., 2020). Prediksi musim memberikan nilai dan keuntungan bagi sektor yang bergantung pada cuaca/iklim sehingga permintaan dan penggunaan prediksi musim telah meningkat di beberapa sektor, seperti pertanian, kesehatan, energi, transportasi, pariwisata, atau pengelolaan air dan lahan (Gerlak et al., 2020; Köberl et al., 2021). Contohnya, manfaat prediksi musim

untuk antisipasi kekeringan, petani dapat merencanakan penanaman komoditas yang toleran kekeringan atau tidak melakukan penanaman. Pengelola waduk dapat merencanakan waktu yang tepat membuka pintu air dan merencanakan distribusi air.

Dasar ilmiah dalam sistem prediksi musim adalah adanya gangguan pada batas bawah atmosfer (*lower boundary*) yang berkembang pada skala waktu yang lebih lambat daripada sistem cuaca. Variasi dalam skala waktu tersebut terjadi karena perbedaan kecepatan rambar gelombang dan kelembaman panas (*thermal inertia*). Komponen sistem iklim yang lambat variasinya di antaranya suhu permukaan laut (SPL), penutupan salju, kelembapan tanah, dan lainnya. Telekoneksi yang signifikan secara statistik antara ENSO bersama indikator iklim global lainnya dengan anomali curah hujan di banyak negara (Pai et al., 2017) menunjukkan peran penting SPL dalam menentukan pola sirkulasi atmosfer di atasnya. Hal ini dapat dilihat dari dampak El Niño yang signifikan pada penurunan curah hujan di Indonesia dan Amerika Selatan bagian utara, sementara terjadi peningkatan curah hujan di Amerika Selatan bagian tenggara, Afrika khatulistiwa bagian timur, dan Amerika Serikat bagian selatan. Fakta bahwa SPL bervariasi dalam rentang waktu yang lebih lama, menunjukkan SPL berpotensi sebagai prediktor untuk prediksi musim yang akurat. Prediksi musim berdasarkan interaksi atmosfer dengan SPL dapat dilakukan dengan menggunakan model iklim yang mengintegrasikan persamaan fisika untuk menggambarkan perubahan dalam energi, massa, momen, dan interaksi atmosfer lautan. Dalam praktiknya prediksi musiman menggunakan SPL untuk memprediksi ENSO, IOD, dapat menggambarkan curah hujan dan iklim ekstrem suatu wilayah.

Salah satu tantangan prediksi musim yang berkaitan dengan ENSO adalah prediksi ENSO pada saat terjadi musim semi di belahan bumi utara (pada bulan Maret, April, dan Mei) yang cenderung kurang akurat dan mengalami prediktabilitas yang rendah dibandingkan musim lain atau disebut dengan istilah *spring predictability barrier* (SPB), di mana model-model prediksi ENSO mengalami kesulitan untuk menghasilkan prediksi ENSO yang akurat. Hal ini terjadi

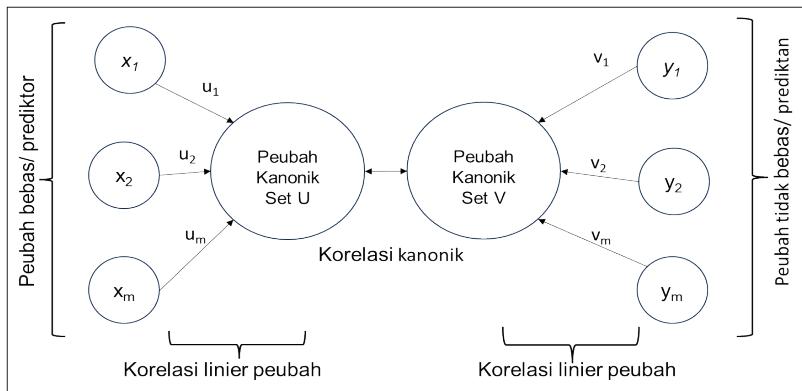
karena pada saat musim semi, ENSO berada dalam masa transisi antara fase El Niño yang lebih dingin dan fase La Niña yang lebih hangat, selama masa transisi ini, sistem iklim mengalami peralihan dari satu kondisi ke kondisi yang lain dan lemahnya hubungan antara atmosfer laut pada musim semi karena berkurangnya gradien SPL rata-rata di Samudra Pasifik tropis sehingga menjadi sulit diprediksi. Kondisi atmosfer dan lautan sedang mengalami penyesuaian dengan perubahan kondisi dan perlu waktu agar sinyal El Niño atau La Niña kembali berkembang sepenuhnya dan dapat terdeteksi dengan baik. Kesalahan dalam memprediksi kondisi awal antara atmosfer dan lautan serta kesalahan model juga menjadi penyebab dari terjadinya SPB. Kesalahan kecil pada kondisi awal atmosfer dan lautan menyebabkan ketidakpastian yang makin besar pada prediksi ENSO. Keterbatasan dalam menyimulasikan interaksi kompleks antara atmosfer dan lautan juga menyebabkan tingkat prediktabilitas model menjadi lebih rendah pada bulan Maret, April, dan Mei (Duan & Wei, 2013; Lai et al., 2018).

2. Metode Prediksi Musim

Secara umum, terdapat tiga jenis metode untuk membuat prediksi musim, yaitu metode empiris (statistik), dinamik, dan *hybrid*. Metode empiris menggunakan hubungan statistik antara prediktor—variabel yang digunakan untuk membuat prediksi—dengan prediktor—variabel yang akan diramalkan. Prediktor diidentifikasi melalui analisis fisis mekanisme yang mengendalikan prediktor. Sebagai contoh, banyak model prediksi di seluruh dunia menggunakan SPL wilayah tropis yang diamati dari bulan sebelumnya sebagai prediktor untuk meramalkan curah hujan dan permukaan tanah. Model yang langsung menggunakan nilai prediktor biasanya disebut model regresi linear sederhana, jika menggunakan banyak prediktor disebut model regresi linear berganda. Untuk meminimalkan kesalahan multikolinearitas (prediktor tidak sepenuhnya independen) dan kesalahan multiplisitas (terlalu banyak prediktor), biasanya dilakukan pengurangan dimensi ruang prediktor melalui perhitungan *empirical orthogonal functions* (EOFs) dari variabel prediktor. Ketika model regresi menggunakan

prediktor EOF sebagai X, model ini disebut regresi komponen utama, atau *principal component regression* (PCR).

Beberapa keuntungan dari metode empiris adalah hanya membutuhkan sumber daya komputasi yang rendah dan mudah diimplementasikan secara operasional. Dirancang untuk konsisten dengan pengamatan dan menghasilkan nilai deterministik dan probabilitas. Beberapa kelemahannya adalah bahwa metode empiris yang paling umum menganggap stasioneritas dalam iklim, cenderung memiliki masalah dalam mereproduksi varians yang diamati dari prediksi, dan sulit untuk mewakili interaksi nonlinear dalam sistem. Beberapa contoh metode empiris, antara lain Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA), Canonical Correlation Analysis (CCA), Singular Value Decomposition (SVD), Principal Component Analysis (PCA) dan lainnya. Sebagai contoh, CCA adalah metode untuk mengukur korelasi antara satu kumpulan peubah dependen dengan satu kumpulan peubah independen. Asumsi statistik yang harus dipenuhi adalah linearitas, normalitas multivariat, homoskedastisitas, dan nonmultikolinearitas. Ilustrasi dari model CCA disajikan pada Gambar 5.2.



Sumber: Modifikasi dari Fan dan Konold (2018)

Gambar 5.2 Ilustrasi Analisis Korelasi Kanonik

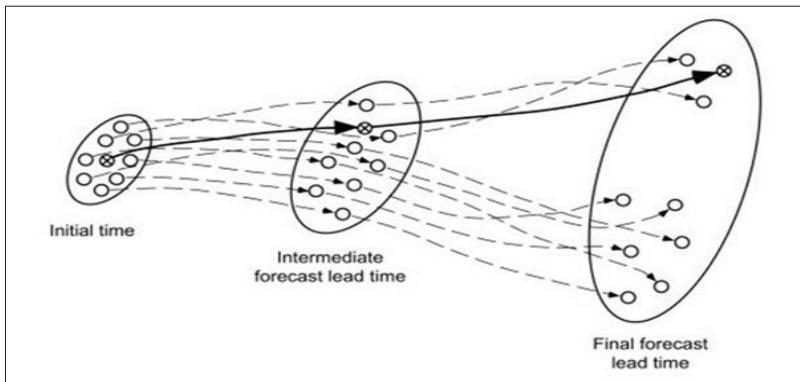
Buku ini tidak diperjualbelikan.

Model dinamik seperti *general circulation model* telah digunakan secara luas dalam prediksi iklim. Metode dinamik tidak dibatasi oleh asumsi linearitas, yang seringkali menjadi asumsi dasar dalam pendekatan prediksi empiris. Sistem prediksi dinamis juga mewakili berbagai proses iklim yang dapat memengaruhi variabilitas musiman di suatu wilayah secara lebih lengkap. Output dari model dinamik sangat luas dengan berbagai variabel (suhu, kelembapan spesifik, angin, curah hujan, kelembapan tanah, insolasi permukaan, dan radiasi matahari) dengan resolusi temporal harian atau lebih tinggi. Perlu dicatat bahwa prediksi musim dinamik dapat menyimulasikan komponen nonlinear dari hubungan telekoneksi (Hoerling & Kumar, 1997.) sehingga lebih baik daripada metode prediksi empiris linear. Salah satu kelemahan metode dinamik adalah memiliki bias dalam rata-rata dan varian. Oleh karena itu, diperlukan koreksi bias menggunakan prediksi *hindcast* untuk memvalidasi dengan observasi.

Sistem prediksi iklim dinamis lebih akurat dalam memprediksi pola iklim yang belum pernah/jarang terjadi sebelumnya, misalnya tren pemanasan terkini dalam suhu atau telekoneksi yang terkait dengan peristiwa ENSO ekstrem. Namun, ketidakpastian dalam kondisi awal dan kesalahan model adalah dua sumber utama akurasi dari model dinamis. Untuk mengurangi ketidakpastian dilakukan asimilasi data dengan menggabungkan data observasi dengan data model (Penny & Hamill, 2017), yang menghasilkan model ansambel. Prediksi ansambel terdiri dari beberapa (biasanya 5–100) hasil model prediksi cuaca numerik, yang berbeda kondisi awalnya dan/atau representasi numerik dari atmosfer yang merupakan dua sumber utama dari ketidakpastian prediksi (Slingo & Palmer, 2011). Dengan menggunakan teknik ansambel, ketidakpastian prediksi dapat dikuantifikasi sehingga dapat digunakan dalam pengambilan keputusan yang lebih baik terkait risiko iklim (Surmaini & Hadi, 2020).

Prediksi musim memiliki tingkat ketidakpastian yang makin tinggi jika prediksi makin jauh ke depan (Gambar 5.3). Pada Gambar 5.3 dapat dilihat bahwa model numerik pada kondisi awal hanya terdapat sedikit perbedaan hasil, makin jauh waktu prediksinya maka

kisaran hasil yang mungkin terjadi akan makin lebar, menunjukkan tingkat ketidakpastian yang makin tinggi, sebaliknya makin dekat waktu prediksi maka sebaran prediksi lebih sempit yang artinya tingkat ketidakpastian lebih rendah. Oleh karena itu, prediksi ansambel yang direpresentasikan oleh garis hitam mengandung ketidakpastian inheren atas berbagai kemungkinan yang dapat terjadi, artinya ketidakpastian yang melekat dalam model prediksi.



Keterangan: Rata-rata ansambel ditunjukkan oleh garis kontinu (—)

Sumber: Wilks (2011)

Gambar 5.3 Sebaran prediksi model numerik yang ditunjukkan oleh lingkaran ellips, makin lebar apabila makin jauh dari kondisi awalnya.

Sistem dinamik yang ada saat ini sangatlah kompleks dan besar, dan sering kali memiliki banyak parameter yang tidak diketahui dalam membuat prediksi sehingga pengembangan metode prediksi dinamik berbasis data dengan dimensi tinggi menjadi fokus akhir akhir ini (Williams et al., 2015; Ghadami & Epureanu, 2022.). Beberapa contoh metode sistem dinamis berbasis *nonlinear regression* (Voss et al., 1999), *nonlinear laplacian spectral analysis* (Giannakis & Majda 2012), *eigensystem realization algorithms* (Juang & Pappa, 1985), *dynamic mode decomposition* (DMD) (Kutz et al., 2016), dan Sistem Jaringan Syaraf Tiruan (Qin et al., 2019).

Pendekatan *hybrid* memanfaatkan kombinasi metode dinamik dan empiris dengan menggunakan output model berbasis fisika untuk mewakili berbagai proses dalam sistem iklim dan model statistik untuk mengoreksi bias dan mengkalibrasinya. Salah satu contoh model *hybrid* adalah menggunakan sistem SINTEX-F2 *Seasonal Prediction System* (Doi et al., 2016, 2017) untuk mendapatkan prediktor anomali suhu muka laut sebagai prediktor suhu permukaan. Prediktor yang diekstrak tersebut digunakan untuk membangun model prediksi statistik menggunakan berbagai algoritma, seperti sistem jaringan syaraf tiruan dengan Single and Multi-Layer Perceptrons (MLP); Linear Support Vector Machines (SVML) dan Radial Kernels Vector Machines (SVMR); Random Forests (RF); dan Bayesian Additive Regression Trees (BART) (Oettli et al., 2022). Strazzo et al. (2019) menggunakan metode Bayesian untuk meningkatkan akurasi prediksi musim suhu udara dan curah hujan dari tujuh model dinamik, yaitu the NCEP Climate Forecast System, version 2 (CFSv2), the Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis Third and Fourth Generation Canadian Coupled Global Climate Model (CMC1 and CMC2), the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory climate model version 2.2 (GFDL), the Forecast-Oriented Low Ocean Resolution version of GFDL climate model 2.5 (GFDL-FLOR), the NASA Goddard Earth Observing System model, version 5 (NASA), dan the Community Climate System Model, version 4 (NCAR-CCSM4).

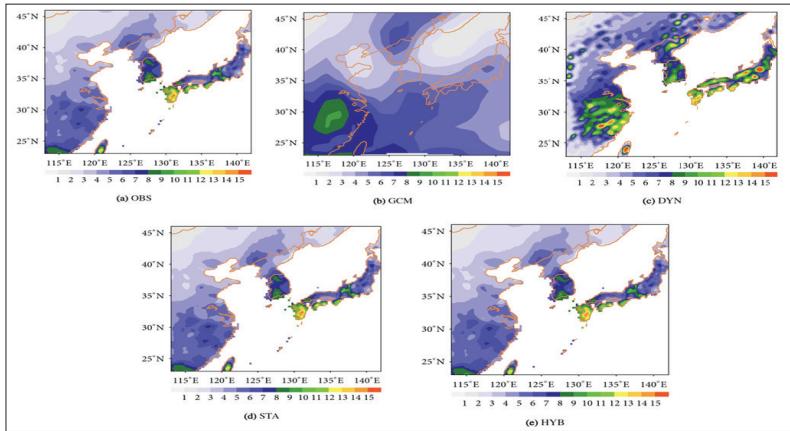
3. *Downscaling* Prediksi Musim

Perkembangan Prediksi iklim dunia saat ini mengandalkan Global Climate Model (GCM), yaitu program komputasi yang menyimulasikan proses fisik dari sistem iklim bumi. Model GCM akan membantu memberikan pemahaman terkait kondisi iklim saat ini dan bagaimana proyeksi iklim ke depan apabila variabel-variabel dari model tersebut berubah. GCM yang mewakili proses fisik dan umpan balik di atmosfer, laut, dan daratan dapat memberikan prakiraan kondisi iklim yang kredibel setidaknya pada skala benua atau global (Gulizia & Camilioni, 2015; Nair et al., 2015). Kelebihan prediksi berbasis GCM adalah mampu memprediksi sampai sembilan bulan ke depan sehingga dapat

digunakan dalam prediksi musiman. Namun, prediksi GCM memiliki berbagai kendala terkait resolusi, akurasi, dan ketidakpastian. GCM memiliki resolusi relatif kasar yang tidak mampu merepresentasikan proses-proses pada skala lokal. Untuk memperoleh informasi skala regional dan lokal dibutuhkan suatu teknik yang disebut dengan *downscaling*. *Downscaling* adalah teknik yang digunakan untuk memperkirakan atau menghasilkan data beresolusi tinggi dari data iklim beresolusi rendah, baik pada skala spasial maupun temporal. Proses *downscaling* umumnya dibutuhkan ketika dampak dari perubahan variabel-variabel iklim tidak dapat diestimasi dari keluaran GCM karena dampak tersebut sangat sensitif terhadap iklim skala lokal atau karena parameter iklim yang menentukan dampak tersebut secara spasial bervariasi (Hidalgo et al., 2008).

Berbagai metode telah dikembangkan dalam *downscaling*, tetapi secara garis besar dapat dikelompokkan menjadi dua jenis pendekatan, yaitu *dynamical downscaling* (DD) dan *statistical downscaling* (SD). DD menggunakan model regional untuk merepresentasikan proses-proses fisis atmosfer dengan resolusi yang lebih tinggi dan akurasi yang lebih baik (Ma et al., 2015). Kendala utama dari metode ini adalah membutuhkan sumber daya komputasi besar, biaya yang lebih mahal, dan lebih kompleks (Zhang & Yan, 2015; Sachindra & Perera, 2016), sedangkan SD menggunakan metode statistik untuk memperoleh hubungan empiris antara keluaran GCM dan data pengamatan (Fistikoglu & Okkan, 2011). Hubungan empiris ini kemudian digunakan untuk menginterpolasi keluaran GCM dengan resolusi global menjadi resolusi yang lebih tinggi. Keunggulan metode ini adalah tidak memerlukan sumber daya komputasi yang tinggi dan waktu simulasi yang jauh lebih pendek. Metode ini lebih banyak dikembangkan karena relatif lebih murah secara komputasi. Berbagai metode statistik yang digunakan, antara lain *canonical correlation analysis* (Juneng et al., 2010), *singular value decomposition* (Kang et al., 2007), komputasi menggunakan jaringan syaraf tiruan (*neural network*) (Pryor & Schoof, 2020), *multiple linear regression analysis* (Mahla et al., 2019), maupun *constructed analogue* (Hidalgo et al.,

2008; Surmaini et al., 2015). Perbandingan prediksi curah hujan GCM dan setelah menggunakan metode *downscaling*, maupun *hybrid* yang merupakan kombinasi DD dan SD, dapat dilihat pada Gambar 5.4.



Keterangan: (a) observasi;
(b) prediksi GCM;
(c) prediksi metode *Dynamical Downscaling*;
(d) prediksi metode *Statistical Downscaling*; dan
(e) *Hybrid method*.

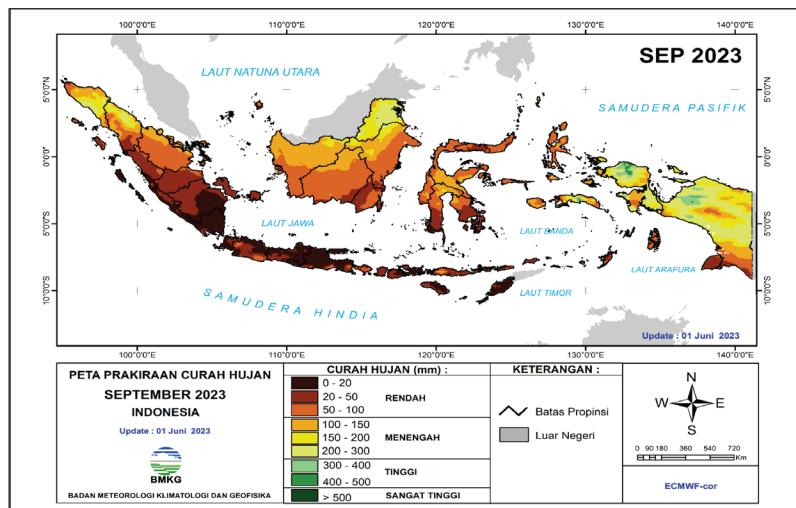
Sumber: Yhang et al. (2007)

Gambar 5.4 Perbandingan Curah Hujan Musim Panas Berdasarkan Data Observasi dan Prediksi Model

4. Perkembangan Metode Prediksi Musim di Indonesia

Di Indonesia, BMKG menggunakan prediksi musim yang bersifat deterministik yang dirilis dua kali setahun sebelum musim hujan dan musim kemarau. Berikut informasi BMKG yang dapat dimanfaatkan untuk pertanian, yaitu prakiraan awal musim (musim hujan dan musim kemarau), prakiraan musim berupa sifat hujan per musim (bawah normal, normal, dan atas normal), puncak musim hujan dan puncak musim kemarau, prakiraan durasi musim hujan dan kemarau, prakiraan curah hujan probabilistik dengan peluang hujan kurang dari 50 mm, 100 mm, dan 150 mm, peluang lebih dari 50 mm, 100 mm,

150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 350 mm, 400 mm, 450 mm, dan 500 mm. Informasi tersebut dikembangkan berdasarkan 699 Zona Musim (ZOM) dalam bentuk peta untuk seluruh wilayah indonesia yang di-update tiap bulan untuk prediksi tiga bulan ke depan dan dapat diakses melalui situs web BMKG dan buku prakiraan musim yang sudah dicetak (BMKG, 2023). Contoh informasi prediksi iklim BMKG disajikan pada Gambar 5.5. Untuk mendukung kebutuhan informasi prediksi pangan, selain informasi awal musim, sangat diperlukan adanya informasi tambahan dari BMKG yang dapat disampaikan sekitar 1-2 bulan sebelum musim tanam dimulai. Informasi yang sangat bermanfaat tersebut mencakup prediksi curah hujan harian atau perkiraan jumlah hari tanpa hujan minimal selama satu bulan setelah awal musim tanam (Surmaini & Syahbuddin, 2016).



Sumber: BMKG (2023)

Gambar 5.5 Contoh Informasi Prediksi Iklim yang Dikeluarkan oleh BMKG

Makmur dan Setiawan (2013) menjelaskan bahwa BMKG melakukan prediksi dengan menggunakan dua kelompok besar model, yaitu model statistik (*time series analysis*) dan dinamis (perhitungan numerik unsur iklim secara global). Selain itu, BMKG juga meng-

gunakan ECMWF *system 5* terkoreksi sebagai salah satu model yang dipakai untuk prediksi hujan dasarian, hujan bulanan, dan prediksi hujan probabilistik. Situs tersebut menyediakan pembaruan terkini, laporan, dan temuan terbaru dalam bidang prediksi iklim global. BMKG juga sudah mengembangkan aplikasi HyBMG yang berisi metode-metode, yaitu Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA), dan Transformasi Wavelet (Nuraini et al., 2019). Aplikasi HyBMG 2.07 dijalankan dengan menggunakan data curah hujan bulanan spasial dari satelit Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Menurut Komalasari et al. (2016), dengan menggunakan aplikasi HyBMG yang merupakan ansambel dari rata-rata hasil empat model prediksi berbasis statistik (ANFIS, ARIMA, Wavelet ANFIS, dan Wavelet ARIMA) dapat meningkatkan hasil prakiraan musim BMKG hingga 44.4% pada ARIMA, ANFIS 43.4%, Wavelet ANFIS 58.6%, dan Wavelet ARIMA hingga 55.6%.

Menurut Muharsyah et al. (2020), perkembangan prediksi musim sudah memasuki babak model matematika yang rumit tentang dinamika interaksi komponen atmosfer-lautan. Interaksi komponen-komponen tersebut mengarah ke perilaku nonlinear yang dapat memperkuat atau meredam variasi iklim. Di beberapa wilayah seperti di Indonesia, hasil model ini memberikan prediksi musim yang cukup baik. Pada prediksi musim di Indonesia, pengaruh dari ENSO dan dampak perubahan iklim merupakan hal yang penting. Model ini mampu memproyeksikan pola cuaca jangka panjang dengan tingkat keakuratan yang makin tinggi. Merupakan tantangan yang besar untuk merepresentasikan kompleksitas ini secara akurat dalam model.

Keterpaduan beberapa teknologi/model prediksi iklim/musim ke depannya diharapkan dapat memberikan informasi yang diperlukan oleh masyarakat pertanian. Mengingat, pengembangan model prediksi yang lebih akurat dan terperinci memungkinkan diperoleh dengan integrasi berbagai sumber data. Metode ansambel yang diperoleh dari integrasi hasil dari beberapa model prediksi berbeda memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang kemungkinan skenario

musim yang akan datang. Prediksi dari ansambel diharapkan dapat mengurangi ketidakpastian dan memberikan perkiraan yang lebih andal sehingga diharapkan petani dapat membuat keputusan yang lebih baik terkait penanaman, pemupukan, dan pengendalian hama. Teknologi kecerdasan buatan atau *artificial intelligence* (AI) juga dapat membantu dalam perkembangan metode prediksi musim. Model-model prediksi musim yang berbasis AI dapat memiliki akurasi yang lebih baik karena dapat mengidentifikasi pola yang rumit dalam data cuaca. Di samping itu, algoritma pembelajaran AI memungkinkan menghasilkan prediksi yang lebih presisi dalam jangka waktu yang lebih panjang dari hasil analisis data historis.

E. Studi Kasus: Penggunaan Prediksi Iklim untuk Mendukung Ketahanan Pangan

Letak Indonesia yang berada di antara Samudra Hindia dan Samudra Pasifik menyebabkan kondisi iklim Indonesia beragam dan dinamis karena sangat dipengaruhi oleh faktor lokal maupun global. Hal ini menyebabkan prediksi kondisi cuaca dan iklim yang akurat di Indonesia memiliki tantangan tersendiri karena cukup sulit untuk menggambarkan kondisi iklim yang sangat kompleks dalam sebuah model prediksi. Lembaga-lembaga terkait terus berusaha meningkatkan kualitas informasi prediksi iklim di Indonesia.

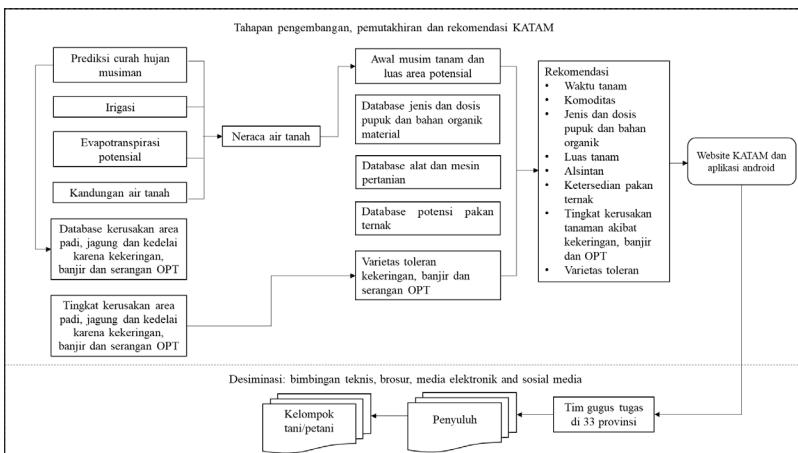
Salah satu tantangan utama dalam memprediksi iklim di Indonesia adalah keterbatasan data observasi. Stasiun cuaca dan pengukuran iklim belum tersebar merata di seluruh wilayah Indonesia yang mewakili kondisi topografi yang beragam dan daerah pedalaman. Ketersediaan data observasi yang memadai diperlukan untuk menggambarkan kondisi yang mendekati kondisi sebenarnya di lapangan dan untuk membentuk model prediksi iklim yang lebih akurat.

Prediksi iklim untuk pertanian bisa berupa penyesuaian waktu dan pola tanam, prediksi curah hujan, prediksi serangan OPT, prediksi kekeringan, prediksi deret hari kering, dan prediksi hari hujan. Salah satu contoh informasi prediksi iklim untuk bidang pertanian di Indonesia adalah Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu (SI

KATAM Terpadu) yang dikembangkan versi web mulai tahun 2011 oleh Kementerian Pertanian yang pada saat itu bekerja sama dengan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), Badan Informasi Geospasial (BIG), dan Badan Pusat Statistik (BPS).

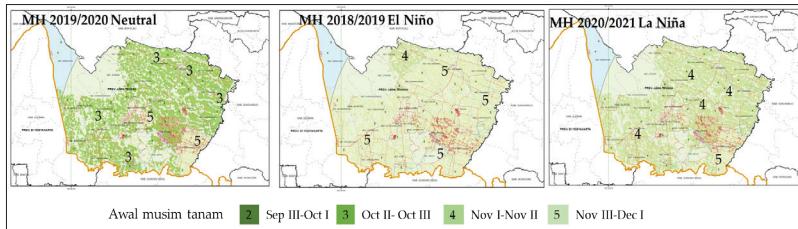
Alur pengembangan dan diseminasi sistem informasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.6. Sistem informasi ini menyediakan informasi yang terintegrasi berupa

- 1) Prediksi waktu dan area tanam untuk tanaman pangan (padi, jagung, dan kedelai) untuk level kecamatan seluruh Indonesia berdasarkan analisis neraca air (Gambar 5.7).
- 2) Informasi rekomendasi berupa rekomendasi varietas, rekomendasi pupuk, rekomendasi alat dan mesin pertanian, ketersediaan pakan ternak, dan prediksi tingkat kerusakan tanaman akibat kekeringan, banjir, serta serangan organisme pengganggu tanaman.
- 3) Prediksi risiko kekeringan tanaman padi (Gambar 5.8). SI KATAM Terpadu dikeluarkan dua kali per tahun untuk musim hujan dan musim kemarau di seluruh wilayah Indonesia.



Sumber: Apriyana et al. (2021)

Gambar 5.6 Alur Pengembangan dan Diseminasi Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu



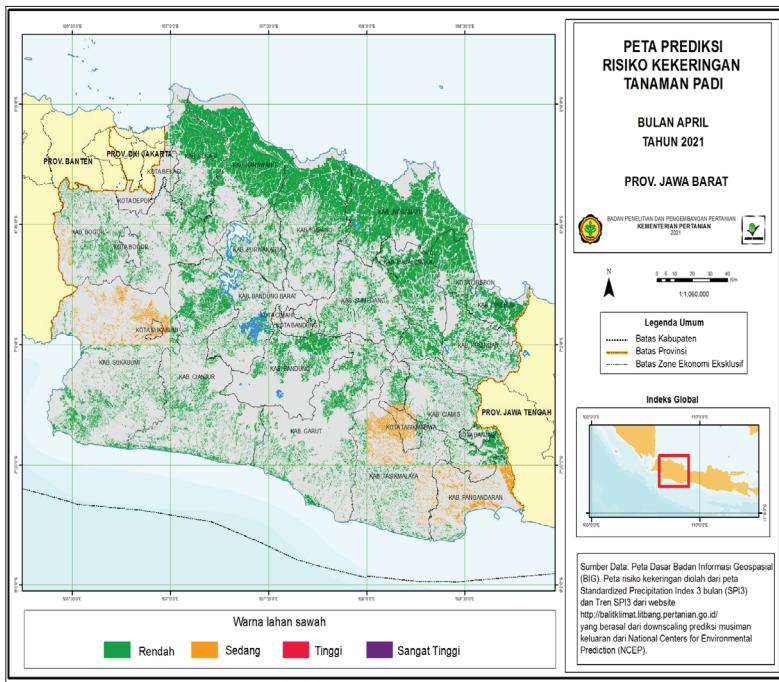
Sumber: Apriyana et al. (2021)

Gambar 5.7 Contoh Kalender Tanam Padi Sawah Musim Hujan (MH) di Kabupaten Klaten

SI KATAM Terpadu telah didiseminasikan oleh Tim Pengembang dan Tim Gugus Tugas dari 33 provinsi melalui bimbingan teknis kepada dinas pertanian, penyuluh pertanian, dan petani pada tingkat desa, kecamatan, kabupaten, dan provinsi serta nasional. Pengguna SI KATAM Terpadu mengatakan bahwa penanaman menggunakan rekomendasi waktu tanam dari SI KATAM Terpadu dapat meningkatkan produksi hampir mencapai 70% dibandingkan dengan waktu tanam biasa yang dilakukan oleh petani.

Selain SI KATAM Terpadu, Kementerian Pertanian juga menyediakan informasi prediksi iklim dalam bentuk peta berupa peluang curah hujan bulanan lebih dari 100 mm, 150 mm, dan 200 mm, serta peluang curah hujan dasarian kurang dari 50 mm dan peluang curah hujan dasarian lebih 50 mm yang dikeluarkan empat kali per tahun untuk prediksi tiga bulan ke depan.

Selain Indonesia, Australia juga memiliki teknologi prediksi iklim untuk pertanian berupa The Climate Services for Agriculture (CSA), yaitu platform dalam jaringan/daring (*online*) yang dikembangkan untuk membantu petani Australia membangun ketahanan terhadap kekeringan dan risiko iklim pada masa depan. Australia memandang bahwa sektor pertanian membutuhkan alat prediksi iklim spesifik lokasi yang baru untuk perencanaan dan pengambilan keputusan yang lebih baik. CSA dikembangkan untuk mempersiapkan skenario iklim masa depan sangat penting bagi petani agar mereka dapat terus menghasilkan tanaman dan ternak dengan produktivitas tinggi (Webb



Sumber: Kementerian Pertanian (2021)

Gambar 5.8 Contoh Informasi Prediksi Risiko Kekeringan Tanaman Padi di Jawa Barat

et al., 2023). Layanan CSA menyediakan informasi iklim historis (1961–sekarang), prakiraan musim (1–3 bulan) dan proyeksi iklim ke depan untuk tanaman apel, barley, canola, kentang, gandum, anggur dan ternak sapi, susu, serta domba.

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) dari Eropa mengembangkan prediksi iklim global dan banyak digunakan oleh negara pengguna, salah satunya adalah BMKG-Indonesia, sebagaimana sudah dijelaskan sebelumnya (Makmur & Setiawan, 2013). ECMWF memiliki berbagai jenis produk prediksi yang berbasis pemodelan atmosfer dan pemodelan lautan dengan untuk prediksi 10 harian dengan resolusi tinggi, prediksi 15 harian,

dan prediksi musiman 7 bulan ke depan. Mereka menyediakan informasi tanpa berbayar (*open data*) dan tersedia juga yang berbayar yang dapat di akses pada situs web <https://www.ecmwf.int/>.

Amerika Serikat melalui National Weather Service (NWS) yang merupakan bagian dari National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) juga menyediakan prakiraan cuaca, peringatan cuaca buruk, dan prospek iklim di seluruh Amerika Serikat melalui situs web yang disebut Web Agriculture and Climate Webpage. Petani dapat mengakses prakiraan dan rekomendasi untuk merencanakan kegiatan pertanian dan mengurangi risiko terkait cuaca. Informasi yang disediakan berupa peta terdiri dari peta prediksi suhu udara, sifat curah hujan beserta tingkat risiko, dan prediksi kekeringan (intensitas dan dampak).

Informasi prediksi iklim di Indonesia yang sudah tersedia selama ini belum menginformasikan tingkat ketepatan (*skill map*). Selain itu metode yang digunakan untuk prediksi iklim juga perlu diinformasikan sehingga dapat diketahui skema maupun proses bagaimana informasi prediksi iklim tersebut dihasilkan. Penting untuk menyediakan informasi mengenai tingkat ketepatan dan metode agar pengguna dapat menilai keandalan prediksi serta memahami proses yang mendasarinya sehingga keputusan yang diambil berbasis data lebih akurat dan terinformasi. Keterbukaan akses terhadap informasi ini akan meningkatkan transparansi, mendorong kolaborasi lintas disiplin, dan membuka peluang pengembangan lebih lanjut oleh berbagai pihak, termasuk peneliti, praktisi, dan pembuat kebijakan untuk menghasilkan inovasi dan solusi iklim yang lebih efektif.

F. Penutup

Pertanian terutama pangan sangat rentan terkena dampak perubahan iklim sehingga adaptasi merupakan prioritas untuk menyesuaikan usaha tani terhadap kondisi iklim. Dalam perencanaan pertanian usaha tani yang adaptif, salah satu upaya yang dilakukan adalah memanfaatkan prediksi musim. Hasil prediksi musim berbasis harian untuk 6–9 bulan ke depan dapat digunakan dalam menyusun

langkah-langkah strategis dalam strategi budi daya pada musim tanam yang akan datang. Prediksi musim juga dapat digunakan dalam pengembangan model dampak pada sektor pangan, seperti prediksi kekeringan pertanian, risiko banjir, dan serangan OPT. Di Indonesia, telah dikembangkan sistem yang berbasis prediksi curah hujan di antaranya untuk memprediksi waktu tanam dan prediksi risiko kekeringan yang dikenal sebagai Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu (SI KATAM Terpadu).

Informasi iklim hanya memberikan manfaat bagi pengguna jika dapat diakses, dipahami, dan dapat ditindaklanjuti. Setelah dirilis, prediksi musim perlu dikomunikasikan kepada pengguna. Interpretasi hasil prediksi merupakan tantangan tersendiri bagi petani dan penyuluh sehingga komunikasi yang baik adalah faktor kunci agar informasi prediksi dipahami secara benar. Diharapkan dengan penerapan upaya upaya tersebut dapat membantu petani dalam menyesuaikan usaha taninya sehingga dapat mengurangi dampak negatif perubahan iklim dan memungkinkan terjaganya keberlanjutan sistem produksi pangan.

Untuk tercapainya manajemen risiko yang minimal pada usaha tani, diperlukan upaya-upaya yang dapat dilakukan secara optimal. Dari sisi teknologi prediksi iklim, rekomendasi yang dapat ditempuh dalam mempersiapkan masyarakat petani yang berketeraan iklim di antaranya melalui terbangunnya hasil prediksi yang lebih akurat yang diperoleh melalui manajemen, pengolahan, dan analisis data yang baik, adanya dukungan dari kemajuan teknologi digital, seperti kecerdasan buatan dan *machine learning*, dan adanya dukungan para pihak dalam bentuk integrasi data dan kolaborasi antara lembaga yang memungkinkan pengambilan keputusan yang menyeluruh dan efektif di tingkat petani. Lebih lanjut, melakukan edukasi terhadap masyarakat tani perlu dilakukan untuk meningkatkan kesadaran dan pemahaman terhadap pentingnya informasi iklim termasuk prediksi sebagai acuan perencanaan tanam mereka.

Referensi

- Asian Development Bank. (2021). *Climate risk country profile: Indonesia*. <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/700411/climate-risk-country-profile-indonesia.pdf>
- Aldrian, E., & Susanto, R. D. (2003). Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 23(12), 1435–1452. <https://doi.org/10.1002/joc.950>.
- Aldrian, E., Surmaini, E., Marwanto, S., Apriyana, Y., Maftu'ah, E., Pramudia, A., Fanggidae, Y. R., Supari, Syafrinno, A. A., Khoir, A. N., Chandrasa, G. T., Muharsyah, R., Suradi, Perdinan, Anggraeni, L., Adi, R. F., Tjahjono, R. E. P., Infrawan, D. Y. D., & Sulistyowati, D. (2022). *Dampak perubahan iklim terhadap sektor pertanian: Fokus komoditas padi dan kopi (arabika dan robusta)*. PI-AREA. <https://pi-dev.co.id/pires/topik/26>.
- Apriyana, Y., Surmaini, E., Estiningtyas, W., Pramudia, A., Ramadhani, F., Suciantini, S., Susanti, E., Purnamayani, R., & Syahbuddin, H. (2021). The integrated cropping calendar information system: A coping mechanism to climate variability for sustainable agriculture in Indonesia. *Sustainability*, 13(11), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su13116495>.
- Arguez, A., & Vose, R. S. (2011). The definition of the standard WMO climate normal: The key to deriving alternative climate normals. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(6), 699–704.
- Arnell, N. W., Lowe, J. A., Challinor, A. J., & Osborn, T. J. (2019). Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. *Climatic Change*, 155, 377–391. <https://doi.org/10.1007/S-10584-019-02464-z>.
- BMKG. (2023). *Buletin Informasi Iklim Juni Tahun MMXXIII No.06 Tahun 2023*.
- BNPB. (2023). *Data informasi bencana Indonesia*. Diakses pada 22 Juni, 2023, dari <https://dibi.bnbp.go.id/home/index2>.
- Braganza, K., Karoly, D. J., & Arblaster, J. M. (2004). Diurnal temperature range as an index of global climate change during the twentieth century. *Geophysical research letters*, 31(13). <https://doi.org/10.1029/2004GL019998>.

- Dariah, A., & Surmaini, E. (2019). Menyalarkan pertanian adaptif terhadap perubahan iklim di era industri 4.0. Dalam F. Djufry, E. Pasandaran, B. Irawan, & M. Ariani (Ed.), *Manajemen sumber daya alam dan produksi mendukung pertanian modern* (91–121). IPB Press. <https://balaikliringkehati.menlhk.go.id/wp-content/uploads/ManajemenSDA-dan-Produksi.pdf>.
- Doi, T., Behera, S. K., & Yamagata, T. (2016). Improved seasonal prediction using the SINTEX-F2 coupled model. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 8, 1847–1867. <https://doi.org/10.1002/2016MS000744>.
- Doi, T., Storto, A., Behera, S. K., Navarra, A., & Yamagata, T. (2017). Improved prediction of the Indian Ocean Dipole mode by use of subsurface ocean observations. *J. Clim.*, 30, 7953–7970. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0915.1>.
- Dore, M. H. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know?. *Environment International*, 31(8), 1167–1181. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.03.004>.
- Duan, W., & Wei, C. (2013). The “spring predictability barrier” for ENSO predictions and its possible mechanism: Results from a fully coupled model. *International Journal of Climatology*, 33(5), 1280–1292. <https://doi.org/10.1002/joc.3513>.
- Fan, X., & Konold, T. R. (2018). Canonical correlation analysis. In *The reviewer's guide to quantitative methods in the social sciences* (G. R. Hancock, L. M. Stapleton, & R. O. Mueller, Ed.). Routledge, New York. pp. 29–41. <https://doi.org/10.4324/9781315755649>.
- Fanggidae, Y. R., Dermoredjo, S. K., & Estiningtyas, W. (2021). Farmer's perception on climate-related disasters and their impacts to support food farming. *E3S Web of Conferences*, 306, Artikel 02028. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130602028>
- Faqih, A., & Nurussyifa, D. (2017). Intraseasonal rainfall variability in North Sumatra and its relationship with Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO). *Dalam IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 54, Artikel 012033). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/54/1/012033>.
- Fistikoglu, O., & Okkan, U. (2011). Statistical downscaling of monthly precipitation using NCEP/NCAR reanalysis data for Tahtali River Basin in Turkey. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(2), 157–164. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000300](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000300).

- Gerlak, A. K., Mason, S. J., Daly, M., Liverman, D., Guido, Z., Soares, M. B., Vaughan, C., Knudson, C., Greene, C., Buizer, J., & Jacobs, K. (2020). The gnat and the bull: Do Climate Outlook forums make a difference? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(6), E771–E784. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0008.1>.
- Ghadami, A. & Epureanu, B. I. (2022). Data-driven prediction in dynamical systems: Recent developments. *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 380, Artikel 20210213. <https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0213>.
- Giannakis, D., & Majda, A. J. (2012). Nonlinear Laplacian spectral analysis for time series with intermittency and low-frequency variability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(7), 2222–2227. <https://doi.org/10.1073/pnas.1118984109>.
- Gulev, S. K., Thorne, P. W., Ahn, J., Dentener, F. J., Domingues, C. M., Gerland, S., Gong, D., Kaufman, D. S., Nnamchi, H. C., Quaas, J., Rivera, J. A., Sathyendranath, S., Smith, S. L., Trewin, B., von Schuckmann, K., & Vose, R. S. (2021). Changing state of the climate system. Dalam V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, & B. Zhou (Ed.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (287–422). Cambridge University Press.
- Gulizia, C., & Camilloni, I. (2015). Comparative analysis of the ability of a set of CMIP3 and CMIP5 global climate models to represent precipitation in South America. *International Journal of Climatology*, 35(4), 583–595. <https://doi.org/10.1002/joc.4005>.
- Hansen, J. E., Sato, M., Simons, L., Nazarenko, L. S., Sangha, I., Kharecha, P., Zachos, J. C., Von Schuckmann, K., Loeb, N. G., Osman, M. B., Jin, Q., Tselioudis, G., Jeong, E., Lacis, A., Ruedy, R., Russell, G., Cao, J., & Li, J. (2023). Global warming in the pipeline. *Oxford Open Climate Change*, 3(1). <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgad008>.
- Hewitt, C. D., Allis, E., Mason, S. J., Muth, M., Pulwarty, R., Shumake-Guillemot, J., Bucher, A., Brunet, M., Fischer, A. M., Hama, A. M., & Kolli, R. K. (2020). Making society climate resilient: International progress under the global framework for climate services. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(2), E237–E252.

- Hidalgo, H. G., Dettinger, M. D., & Cayan, D. R. (2008). *Downscaling with constructed analogues: Daily precipitation and temperature fields over the United States* (PIER Final Project Report, CEC-500-2007-123). California Energy Commission. <https://core.ac.uk/download/pdf/489442819.pdf>.
- Hoerling, M. P., & Kumar, A. (1997). Why do North American climate anomalies differ from one El Niño event to another? *Geophysical Research Letters*, 24(9), 1059–1062.
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, Ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- IPCC. (2022). Annex I: Glossary (R. van Diemen, J. B. R. Matthews, V. Möller, J. S. Fuglestvedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, A. Reisinger, & S. Semenov, Ed.). Dalam P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, & J. Malley (Ed.), *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.020>.
- Juang, J., & Pappa, R.S. (1985). An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 8(5). <https://doi.org/10.2514/3.20031>.
- Juneng, L., Tangang, F. T., Kang, H., Lee, W. J., & Seng, Y. K. (2010). Statistical downscaling forecasts for winter monsoon precipitation in Malaysia using multimodel output variables. *Journal of Climate*, 23(1), 17–27. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2873.1>.
- Kang, H., An, K. H., Park, C. K., Solis, A. L. S., & Stithichivapak, K. (2007). Multimodel output statistical downscaling prediction of precipitation in the Philippines and Thailand. *Geophysical research letters*, 34(15), L15710. <https://doi.org/10.1029/2007GL030730>.
- Kementerian Pertanian. (2021). *Kalender tanam tanaman padi*. KATAM Musim Kemarau, April–September. SI Katam Terpadu 3.2. Kementerian Pertanian.

- Köberl, J., François, H., Cognard, J., Carmagnola, C., Prettenthaler, F., Damm, A., & Morin, S. (2021). The demand side of climate services for real-time snow management in Alpine ski resorts: some empirical insights and implications for climate services development. *Climate Services*, 22, 100238. <https://doi.org/10.1016/j.ciser.2021.100238>.
- Komalasari, K. E., Fajariana, Y., Nuraini, T. A., & Anggraeni, R. (2016). Aplikasi metode Ensemble Mean untuk meningkatkan reliabilitas prediksi HyBMG. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 17(1), 47–52.
- Kusfirianti, F., & Wiratmo, J. (2022). Rainfall prediction due to the Madden Julian Oscillation factor at the equator. Dalam *Proceedings of Malikussaleh International Conference on Multidisciplinary Studies (MICoMS)* (Vol. 3). <https://doi.org/10.29103/micoms.v3i.231>.
- Kutz, J. N., Brunton, S. L., Brunton, B. W., & Proctor, J. L. (2016) *Dynamic mode decomposition: data-driven modeling of complex systems*. SIAM.
- Lai, A. W. C., Herzog, M., & Graf, H. F. (2018). ENSO forecasts near the spring predictability barrier and possible reasons for the recently reduced predictability. *Journal of Climate*, 31(2), 815–838. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0180.1>.
- Liu, S., Waqas, M. A., Wang, S. H., Xiong, X. Y., & Wan, Y. F. (2017). Effects of increased levels of atmospheric CO₂ and high temperatures on rice growth and quality. *PLoS One*, 12(11), e0187724. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187724>.
- Lynas, M., Houlton, B. Z., & Perry, S. (2021). Greater than 99% consensus on human-caused climate change in the peer-reviewed scientific literature. *Environmental Research Letters*, 16(11), 114005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2966>.
- Ma, J., Wang, H., & Fan, K. (2015). Dynamic downscaling of summer precipitation prediction over China in 1998 using WRF and CCSM4. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32(5), 577–584. <https://doi.org/10.1007/s00376-014-4143-y>.
- Mahla, P., Lohani, A. K., Chandola, V. K., Thakur, A., Mishra, C. D., & Singh, A. (2019). Downscaling of precipitation using multiple linear regression over Rajasthan state. *Current World Environment*, 14(1), 68–98. <http://dx.doi.org/10.12944/CWE.14.1.09>.
- Makmur, E. E. S., & Setiawan, A. M. (2013). Sistem dan teknologi peramalan iklim. Dalam *Prosiding seminar nasional sains dan aplikasi komputasi (SENSAKOM)*.

- Muharsyah, R., Ripaldi, A., Maharani, T., Fitrianti, N., Hanif, R. D., Denata, M., Eggy, A. C., & Wahyuni, N. (2020). Perbandingan model Kopel ECMWF System 4 dan CFSv2 untuk prediksi musim di Indonesia. *Megasains*, 11(1), 1–11.
- Mulyaqin, T. (2020). The impact of El Niño and La Niña on fluctuation of rice production in Banten province. *Agromet*, 34(1), 34–41. <https://doi.org/10.29244/j.agromet.34.1.34-41>.
- Nair, A., Mohanty, U. C., & Panda, T. C. (2015). Improving the performance of precipitation outputs from Global Climate Models to predict monthly and seasonal rainfall over the Indian subcontinent. *Comptes Rendus Geoscience*, 347(2), 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2015.03.004>.
- Naylor, R. L., Battisti, D. S., Vimont, D. J., Falcon, W. P., & Burke, M. B. (2007). Assessing risks of climate variability and climate change for Indonesian rice agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(19), 7752–7757.
- Nuraini, T. A., Nuryanto, D. E., Komalasari, K. E., Satyaningsih, R., Fajariana, Y., Anggraeni, R., & Sopaheluwakan, A. (2019). Pengembangan model HyBMG 2.07 untuk prediksi iklim di Indonesia dengan menggunakan data Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 20(2), 101–112.
- Oettli, P., Nonaka, M., Richter, I., Koshiba, H., Tokiya, Y., Hoshino, I., & Behera, S. K. (2022). Combining dynamical and statistical modeling to improve the prediction of surface air temperatures 2 months in advance: A hybrid approach. *Frontiers in Climate*, 4, 862707. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.862707>.
- Pai, D. S., Rao, A. S., Senroy, S., Pradhan, M., Pillai, P. A., & Rajeevan, M. (2017). Performance of the operational and experimental long-range forecasts for the 2015 southwest monsoon rainfall. *Current Science*, 112(1), 68–75.
- Pandia, F. S., Sasmito, B., & Sukmono, A. (2019). Analisis pengaruh angin monsun terhadap perubahan curah hujan dengan penginderaan jauh (Studi kasus: Provinsi Jawa Tengah). *Jurnal Geodesi Undip*, 8(1), 278–287. <https://doi.org/10.14710/jgundip.2019.22581>.
- Pendergrass, A. G., Knutti, R., Lehner, F., Deser, C., & Sanderson, B. M. (2017). Precipitation variability increases in a warmer climate. *Scientific Reports*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17966-y>.

- Penny, S. G., & Hamill, T. M. (2017). Coupled data assimilation for integrated earth system analysis and prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(7), ES-169–ES-172. <https://www.jstor.org/stable/10.2307/26243775>.
- Perdinan, P., Atmaja, T., Adi, R. F., & Estiningtyas, W. (2019). Adaptasi perubahan iklim dan ketahanan pangan: telaah inisiatif dan kebijakan. *Jurnal Hukum Lingkungan Indonesia*, 5(1), 60–87. <https://doi.org/10.38011/jhli.v5i1.75>.
- Pryor, S. C., & Schoof, J. T. (2020). Differential credibility assessment for statistical downscaling. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(8), 1333–1349. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0296.1>.
- Qin, T., Wu, K., & Xiu, D. (2019). Data driven governing equations approximation using deep neural networks. *Journal of Computational Physics*, 395, 620–635. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.06.042>.
- Rahman, S. (2018). *Membangun pertanian dan pangan untuk mewujudkan kedaulatan pangan*. Deepublish.
- Ranasinghe, R., Ruane, A. C., Vautard, R., Arnell, N., Coppola, E., Cruz, F. A., Dessai, S., Islam, A. S., Rahimi, M., Ruiz Carrascal, D., Sillmann, J., Sylla, M. B., Tebaldi, C., Wang, W., & Zaaboul, R. (2021). Climate change information for regional impact and for risk assessment. Dalam V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Ed.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1767–1926). Cambridge University Press.
- Sachindra, D. A., & Perera, B. J. C. (2016). Statistical downscaling of general circulation model outputs to precipitation accounting for Non-Stationarities in Predictor-Predictand Relationships. *PLoS One*, 11(12), e0168701. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168701>
- Sari, H. P., & Sari, S. K. (2022). Dampak perubahan iklim terhadap produksi padi. *Science and Research Journal Of Mai Wandeu*, 2(1), 87–94. <https://doi.org/10.31933/srjmw.v2i1.71>.
- Slingo, J., & Palmer, T. (2011). Uncertainty in weather and climate prediction. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1956), 4751–4767. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0161>.

- Strazzo, S., Collins, D. C., Schepen, A., Wang, Q. J., Becker, E., & Jia, L. (2019). Application of a Hybrid Statistical-Dynamical System to Seasonal Prediction of North American Temperature and Precipitation. *Monthly Weather Review*, 147(2), 607–625.
- Subagyono, K., Surmaini, E., Estiningtyas, W., & Susanti, E. (2022). Causes of climate change and its impacts on agriculture. Dalam E. Husen, S. Marwanto, & F. Agus (Ed), *Strengthening agricultural resilience against climate change through climate smart agriculture*. IAARD Press. <https://repository.pertanian.go.id/server/api/core/bitstreams/c8960f0e-2e2D-4a3c-bcf7-0000b807a042/content>
- Surmaini, E. (2016). Pemantauan dan Peringatan dini kekeringan pertanian di Indonesia. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 10(1), 37–50.
- Surmaini, E., & Agus, F. (2020). Pengelolaan resiko iklim untuk pertanian berkelanjutan di Indonesia: Sebuah tinjauan. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, 39(1), 48–60. <https://doi.org/10.21082/jp3.v39n1.2020.p48-60>.
- Surmaini, E., & Faqih, A. (2016). Kejadian iklim ekstrem dan dampaknya terhadap pertanian tanaman pangan di Indonesia. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 10(2), 115–128. <https://repository.pertanian.go.id/handle/123456789/2245>.
- Surmaini, E., & Hadi, T. W. (2020). Verifikasi prediksi curah hujan ensemble menggunakan metode Roc. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 21(1), 37–44. <http://202.90.199.54/jmg/index.php/jmg/article/view/618>.
- Surmaini, E., & Syahbuddin, H. (2016). Kriteria awal musim tanam: tinjauan prediksi waktu tanam padi di Indonesia. *Jurnal Litbang Pertanian*, 35(2), 47–56.
- Surmaini, E., Hadi, T. W., Subagyono, K., Pasarminggu, S. J., & Puspito, N. T. (2015). Prediction of drought impact on rice paddies in west Java using analogue downscaling method. *Indonesian Journal of Agriculture Science*, 16(1), 21–30. <https://repository.pertanian.go.id/handle/123456789/42>.
- Susanti, E., Surmaini, E., & Estiningtyas, W. (2018). Parameter iklim sebagai indikator peringatan dini serangan hama penyakit tanaman. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 12(1), 59–70.
- Sutardi, Apriyana, Y., Rejekiningrum, P., Alifia, A. D., Ramadhani, F., Darwis, V., & Fadwiwati, A. Y. (2022). The transformation of rice crop technology in Indonesia: Innovation and sustainable food security. *Agronomy*, 13(1), 1. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010001>.

- Utami, A. W., & Hardyastuti, S. (2011). El Niño, La Niña, dan penawaran pangan di Jawa, Indonesia. *Jurnal Ekonomi Pembangunan*, 12(2), 257–271.
- Voss, H.U., Kolodner, P., Abel, M., & Kurths, J. (1999). Amplitude equations from spatiotemporal binary-fluid convection data. *Phys. Rev. Lett.*, 83, 3422. <https://doi:10.1103/PhysRevLett.83.3422>.
- Webb, L., Tozer, C., Bettio, L., Darbyshire, R., Robinson, B., Fleming, A., Tijs, S., Bodman, R., & Prakash, M. (2023). Climate services for agriculture: Tools for informing decisions relating to climate change and climate variability in the wine industry. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2023(1). <https://doi.org/10.1155/2023/5025359>.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic Press.
- Williams, M. O., Kevrekidis, I. G., & Rowley, C. W. (2015). A data-driven approximation of the Koopman operator: Extending dynamic mode decomposition. *Journal of Nonlinear Science*, 25(6), 1307–1346. <https://doi:10.1007/s00332-015-9258-5>.
- Winarno, G. D., Harianto, S. P., & Santoso, T. (2019). *Klimatologi pertanian*. Pusaka Media.
- WMO. (2007). *The role of climatological normals in a changing climate*. World Meteorological Organization. WCDMP-No. 61, WMO-TD No. 1377.
- WMO. (2021). *State of the global climate 2020*. World Meteorological Organization. WMO-No. 1264.
- Yhang, Y. B., Sohn, S. J., & Jung, I. W. (2017). Application of dynamical and statistical downscaling to East Asian summer precipitation for finely resolved datasets. *Advances in Meteorology*, ID 2956373. <https://doi:10.1155/2017/2956373>.
- Yuan, D., Wang, J., Xu, T., Xu, P., Hui, Z., Zhao, X., Luan, Y., Zheng, W., & Yu, Y. (2011). Forcing of the Indian Ocean Dipole on the interannual variations of the tropical Pacific Ocean: roles of the Indonesian throughflow. *Journal of Climate*, 24(14), 3593–3608. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3649.1>.
- Zhang, X., & Yan, X. (2015). A new statistical precipitation downscaling method with Bayesian model averaging: a case study in China. *Climate Dynamics*, 45, 2541–2555. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2491-7>.

Zhao, J., Bindi, M., Eitzinger, J., Ferrise, R., Gaile, Z., Gobin, A., Holzkämper, A., Kersebaum, K., Kozyra, J., Kriauciūnienė, Z., Loit, E., Nejedlik, P., Nendel, C., Niinemets, Ü., Palosuo, T., Peltosen-Sainio, P., Potopová, V., Ruiz-Ramos, M., Reidsma, P., . . . Olesen, J. E. (2022). Priority for climate adaptation measures in European crop production systems. *European Journal of Agronomy*, 138, 126516. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126516>.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bab VI

Operasional Analisis dan Prediksi Musim di Indonesia

Robi Muharsyah, Supari, Dian Nur Ratri, Achmad Fachri Radjab, Ardhasesna Sopaheluwakan, Amsari Mudzakir Setiawan, Adi Ripaldi, Fatchiyah, Damiana Fitria Kusatiti, Adyaksa Budi Raharja, Novi Fitrianti, Tiar Maharani, Niken Wahyuni, Arda Yuswantoro, Marlin Denata, Rosi Hanif Damayanti, Muhammad Agfi Isra Ramadhan, Alexander Eggy, Fathiya Nurrahmanita, Indra Gustari, Syahru Romadhon, Diah Ariefiyanti, Mia Rosmiati, Suci Pratiwi, Ridha Rahmat, Hasalika Nurjanah, Alif Akbar Syafriano, Dyah Ayu Kartika, Yohanes Agung Kistomo

Prediksi iklim merupakan hal yang mutlak harus dilakukan agar sektor pertanian dapat memberi kinerja yang optimal dan menunjang ketahanan pangan nasional. Dalam bab sebelumnya telah dibahas adanya tantangan perubahan iklim dan iklim ekstrem yang perlu ditangani dalam memprediksi iklim pada masa yang akan datang. Selain itu, telah dibahas pula beberapa model iklim yang dapat digunakan untuk memprediksi iklim. Informasi iklim hasil pemodelan yang diperoleh oleh masyarakat haruslah informasi yang memiliki akurasi baik dan tervalidasi. Dalam Bab V telah dibahas secara singkat bahwa informasi prediksi iklim untuk seluruh wilayah Indonesia disediakan oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). BMKG menyajikan data prediksi iklim berbasis Zona Musim yang mencakup prakiraan awal musim (awal musim hujan dan musim kemarau), perbandingan

R. Muharsyah et al.
BMKG, e-mail: robi.muharsyah@gmail.com

© 2024 Editor & Penulis

Muharsyah, R., Supari, Ratri, D. N., Radjab, A. F., Sopaheluwakan, A., ..., Kistomo, Y. A. (2024). Operasional analisis dan prediksi musim di Indonesia. Dalam D. E. Nuryanto & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (159–193). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1244.c1390. E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

prakiraan awal musim terhadap kondisi normal, dan prakiraan sifat hujan. Dalam bab ini dibahas bagaimana operasional analisis dan prediksi musim di Indonesia yang dilakukan oleh BMKG secara lebih detail yang diawali pembahasan ragam tipe hujan di Indonesia.

A. Ragam Tipe Hujan di Indonesia

Wilayah Indonesia berada pada posisi geografis yang unik, yaitu di antara benua Asia dan Australia, serta di antara Samudra Hindia dan Samudra Pasifik. Posisi geografis ini memberi beberapa konsekuensi terhadap kondisi iklim dan dinamika atmosfer di Indonesia, yaitu dengan adanya sistem tekanan udara dan proses interaksi antara atmosfer dan laut. Selain itu, keberadaan monsun dari benua Asia atau biasa dikenal sebagai angin baratan, dan Australia atau dikenal sebagai angin timuran yang berhembus melintasi wilayah Indonesia berdampak pada perubahan dimulainya musim hujan dan kemarau.

Berbagai fenomena dalam berbagai skala turut memengaruhi keragaman iklim di Indonesia, antara lain pada skala submusiman, seperti siklus Madden Julian Oscillation (MJO), Gelombang Ekuator, dan Siklon Tropis yang sesekali memberikan pengaruh dalam peningkatan hujan. Lalu pada skala antartahunan terdapat El Niño Southern Oscillation (ENSO). Selain itu, topografi wilayah Indonesia yang kompleks turut memengaruhi keragaman iklim di Indonesia, khususnya curah hujan.

Sejalan dengan pemahaman tentang kompleksitas iklim di Indonesia, sejumlah penelitian telah banyak dilakukan oleh para ahli iklim Indonesia (Aldrian & Dwi Susanto, 2003; Borema, 1926; Tjasyono, 1999; Winarso, 2001), serta para ahli iklim di BMKG (Mamenun et al., 2014). Secara umum, kajian dari Tjasyono (1999), Winarso (2001), Aldrian dan Susanto (2003) mengklasifikasikan curah hujan di Indonesia menjadi tiga tipe berdasarkan bentuk siklus hujan tahunan, yaitu (1) tipe A atau tipe monsun, (2) tipe B atau tipe ekuatorial, dan (3) tipe C atau tipe lokal. Tipe monsun memiliki satu puncak curah hujan yang biasa terjadi di akhir atau awal tahun dan biasanya bersamaan dengan berlangsungnya monsun Asia, tipe

ekuatorial memiliki dua puncak curah hujan yang biasanya terjadi pada bulan Maret dan Oktober, sedangkan tipe lokal merupakan tipe yang seperti berbalikan dari tipe monsun.

Adanya tiga pola umum curah hujan di Indonesia berimplikasi pada ketidakseragaman waktu kedatangan musim yang terjadi antara tipe tersebut. Bahkan, meskipun di dalam satu tipe yang sama, masih ditemukan keragaman awal musim ataupun panjang musim, antara suatu wilayah dengan wilayah di sekitarnya. Oleh karena itu, agar keragaman tersebut dapat disederhanakan, BMKG menggunakan istilah Zona Musim (ZOM) untuk mengidentifikasi wilayah-wilayah dengan kemiripan siklus hujan tahunan dan banyaknya musim yang ada di wilayah tersebut.

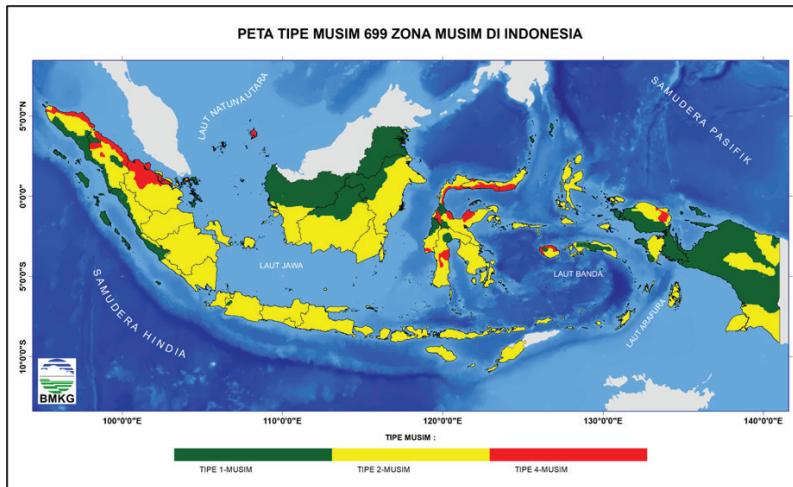
B. Zona Musim (ZOM) sebagai Unit Spasial Prediksi Musim

Operasional layanan prediksi musim yang dilakukan oleh BMKG, diawali dengan mengelompokkan wilayah Indonesia menjadi ZOM. Istilah ZOM merujuk pada kesamaan pola siklus hujan tahunan antarlokasi (grid atau titik) satu dengan lainnya (BMKG, 2021a). Kesamaan tersebut bisa berasal dari pola hujan tahunan, awal musim, jumlah curah hujan dalam satu musim, puncak musim atau durasi musim. Sejak tahun 2000-an, istilah ZOM silih berganti, mulai dari Daerah Prakiraan Musim (DPM) kemudian Zona Prakiraan Iklim (ZPI), tetapi tujuannya tetap sama, yaitu sebagai unit spasial dalam memantau perkembangan musim dan melakukan prediksi musim di Indonesia.

Saat ini, terdapat 699 ZOM di Indonesia yang merupakan pemutakhiran ZOM terbaru yang dibuat berdasarkan data rata-rata hujan periode 1991–2020 (BMKG, 2021b) dan telah dipublikasikan dalam buku *Pemutakhiran ZOM 1991–2020* (BMKG, 2021a). ZOM terbaru ini dibuat menggunakan data hujan penggabungan (*blending*) antara pengamatan *in situ* pos hujan dengan satelit, kemudian di interpolasi ke resolusi $0,05^\circ \times 0,05^\circ$. Selain data hujan penggabungan (*blending*), data *Digital Elevation Meter* dari United State Geologi-

cal Survey (USGS), juga dipakai dalam menentukan delineasi batas antar-ZOM. Perbedaan antara satu ZOM dengan ZOM lainnya di antaranya terdapat pada perbedaan awal musim, panjang musim, puncak musim, atau jumlah hujan dalam satu musim.

Dalam buku *Pemutakhiran ZOM 1991–2020*, dijelaskan bahwa ada dua tipe ZOM di Indonesia, pertama disebut sebagai ZOM tipe satu musim dan kedua, ZOM tipe lebih dari satu musim, yaitu dua atau empat musim (Gambar 6.1). Pada ZOM tipe satu musim secara klimatologi hanya ada satu musim, hujan atau kemarau saja. Sebagai contoh, Gambar 6.2a adalah ilustrasi untuk tipe ZOM satu musim dengan kondisi Hujan Sepanjang Tahun (HST). Pada ZOM HST, tidak ditemukan lebih dari dua dasarian berurutan dengan curah hujan kurang dari 50 milimeter (total curah hujan tiga dasarian berurutan kurang dari 150 milimeter perdasarian), dengan kata lain tidak ditemukan adanya periode musim kemarau. Sebaliknya, Gambar 6.2b adalah ilustrasi untuk tipe ZOM satu musim dengan kondisi Kemarau Sepanjang Tahun (KST). Pada KST, tidak ditemukan lebih dari dua dasarian berurutan dengan curah hujan lebih atau sama dengan 50 milimeter (total curah hujan tiga dasarian berurutan yang lebih atau sama dengan 150 milimeter). Dengan kata lain tidak ditemukan adanya periode musim hujan. Ada 113 ZOM tipe satu musim atau 16% dari total 699 ZOM, yang tersebar di setiap pulau seperti ditunjukkan oleh wilayah berwarna hijau pada Gambar 6.1.



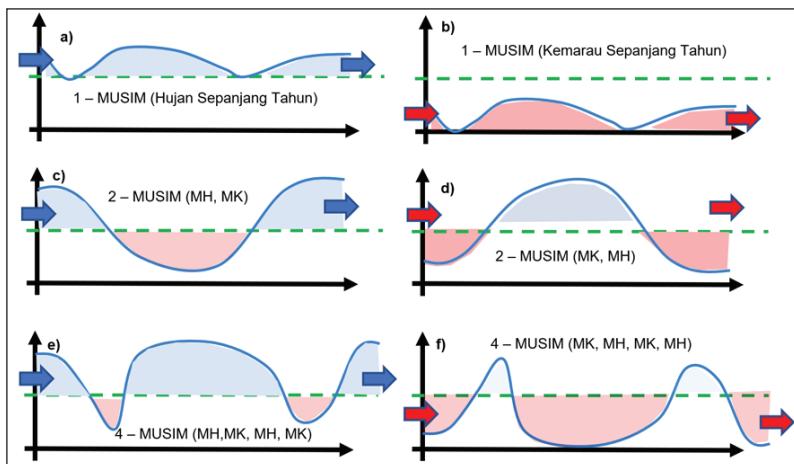
Sumber: BMKG (2013)

Gambar 6.1 Sebaran ZOM dengan Tipe Satu Musim (Hijau), Dua Musim (Kuning), dan Empat Musim (Merah)

Tipe kedua adalah ZOM yang memiliki lebih dari satu musim. Lebih dari satu musim artinya dalam pola klimatologi hujan dasarian ditemukan adanya lebih dari satu musim, bisa dua atau empat musim. Secara keseluruhan tipe kedua ini ditemukan pada 586 ZOM atau sebanyak 86% dari total 699 ZOM, dengan persebaran pada tiap pulau ditunjukkan oleh wilayah berwarna kuning pada Gambar 6.1, serta rincian pada setiap pulau diberikan pada Tabel 6.1. Gambar 6.2c adalah tipe dua musim dengan periode musim hujan terjadi di awal dan akhir tahun, dengan musim kemarau terjadi di pertengahan tahun. Sebaliknya, Gambar 6.2d adalah tipe dua musim dengan musim kemarau terjadi di awal dan akhir tahun, dengan musim hujan terjadi di pertengahan tahun. Secara keseluruhan, jumlah ZOM dengan tipe dua musim adalah sebanyak 537 ZOM di Indonesia.

Selanjutnya, selain tipe dua musim, juga terdapat ZOM dengan tipe empat musim. ZOM dengan tipe ini mempunyai dua musim kemarau dan dua musim hujan dalam pola klimatologi hujan dasarian. Gambar 6.2e adalah tipe empat musim diawali dengan telah

terjadi musim hujan dari tahun sebelumnya, kemudian diikuti periode musim kemarau pertama (MK1), kemudian musim hujan pertama (MH1), kemudian diikuti kembali oleh musim kemarau kedua (MK2), lalu musim hujan kedua (MH2). Sebaliknya, pada Gambar 6.2f, tipe empat musim diawali dengan telah terjadinya musim kemarau dari tahun sebelumnya, kemudian diikuti periode musim hujan pertama (MH1), musim kemarau pertama (MK1), kemudian diikuti kembali oleh musim hujan kedua (MH2), lalu musim kemarau kedua (MK2).



Keterangan: (a) Satu musim—Hujan Sepanjang Tahun (HST), (b) Satu musim—Kemarau Sepanjang tahun (KST), (c) dua musim—MH lalu MK, (d) dua musim—MK lalu MH, (e) empat musim—MH lalu MK lalu MH lalu MK, (f) empat musim—MK lalu MH lalu MK lalu MH.

Sumber: BMKG (2021)

Gambar 6.2 Ilustrasi Pola Klimatologi Hujan Dasarian yang Menunjukkan Perbedaan Tipe Musim

Setelah dapat dibedakan ZOM dengan tipe satu musim, dua musim, dan empat musim, ZOM terbaru ini dibedakan lagi berdasarkan pola klimatologi. Ada tiga pola klimatologi hujan dasarian yang sama dengan yang ditemukan oleh Aldrian dan Susanto (2003). Pada akhirnya, kombinasi jumlah musim dalam setahun dan pola

klimatologi hujan menghasilkan tipe ZOM yang lebih detail melengkapi yang sudah ditemukan oleh penelitian sebelumnya oleh Aldrian dan Susanto (2003). Berikut pengelompokan 699 ZOM yang saat ini dipakai oleh BMKG dalam operasional analisis dan prediksi musim.

- 1) Tipe ZOM Monsunal adalah ZOM yang memiliki pola hujan tahunan dengan satu periode hujan tertinggi dan satu periode hujan terendah. Hujan tertinggi terjadi pada periode berlangsungnya monsun Asia, biasanya terjadi di sekitar awal atau akhir tahun. ZOM dengan tipe monsun dibedakan lagi menjadi dua subtipe sebagai berikut.
 - a) Tipe ZOM Monsunal-1 (MON1), berpola monsun dan hanya mempunyai satu musim, yaitu musim hujan sepanjang tahun (HST).
 - b) Tipe ZOM Monsunal-2 (MON2), berpola monsun dan mempunyai dua musim, yaitu musim kemarau dan musim hujan.
- 2) Tipe ZOM Ekuatorial adalah ZOM yang memiliki pola hujan tahunan dengan dua puncak hujan, tipe ini terdiri dari beberapa subtipe, sebagai berikut.
 - a) Tipe ZOM Ekuatorial-1 (EKT1), berpola ekuatorial dan hanya mempunyai satu musim, yaitu musim hujan sepanjang tahun (HST).
 - b) Tipe ZOM Ekuatorial-2 (EKT2), berpola ekuatorial dan mempunyai dua musim, yaitu musim kemarau dan musim hujan.
 - c) Tipe ZOM Ekuatorial-4 (EKT4), berpola ekuatorial dan mempunyai empat musim, yaitu dua periode musim kemarau dan dua periode musim hujan.
- 3) Tipe ZOM Lokal adalah ZOM yang memiliki pola hujan tahunan berbeda dengan tipe monsun dan juga berbeda dengan tipe ekuatorial. ZOM ini umumnya memiliki satu periode hujan tertinggi dan satu periode hujan rendah, tetapi hujan tertingginya tidak terjadi pada periode monsun Asia. Tipe ini terdiri dari tipe-tipe berikut.

- a) Tipe ZOM Lokal-1 (LK1), berpola lokal dan hanya mempunyai satu musim, yaitu periode musim hujan sepanjang tahun (HST).
- b) Tipe ZOM Lokal-2 (LK2), berpola lokal dan mempunyai dua musim, yaitu satu periode musim kemarau dan satu periode musim hujan.
- c) Tipe ZOM Lokal-4 (LK4), berpola lokal dan mempunyai empat musim, yaitu dua periode musim kemarau dan dua periode musim hujan.
- d) Tipe ZOM Lokal-5 (LK5), berpola lokal dan hanya mempunyai satu musim, yaitu periode kemarau sepanjang tahun (KST).

Tabel 6.1 Jumlah Subtipe ZOM pada Tiap Pulau Besar

Pulau	MON1	MON2	EKT1	EKT2	EKT4	LK1	LK2	LK4	LK5	Total
Sumatra	53	31	46	26						156
Jawa	1	192								193
Bali	20									20
NTB	27									27
NTT	28									28
Kalimantan	20	42	3	2						67
Sulawesi	4	51	2	12	20	11	1	3		104
Maluku	1	11	1	18	2	4	3			40
Papua	23	14	12	3	8	3	1			64
Total	49	438	49	81	48	12	17	2	3	699
Persentase	7,0	62,7	7,0	11,7	6,7	1,7	2,4	0,3	0,4	100

Keterangan: Khusus MON1, EKT1, dan LK1 adalah ZOM dengan tipe satu musim dengan total ketiganya 113 ZOM.

Sumber: BMKG (2023)

C. Tahapan Pembuatan Prediksi Musim di BMKG

Musim adalah fenomena yang terjadi di bumi yang berhubungan dengan kondisi iklim dan mengalami transformasi dalam jangka waktu yang telah ditentukan dalam setahun, mencakup perubahan cuaca, suhu, dan faktor-faktor alam lainnya (Slingo, 2015). Musim

di suatu wilayah dapat disimulasikan bahkan diprediksikan menggunakan model iklim. Lembaga-lembaga meteorologi di beberapa negara di dunia menggunakan berbagai metode dan model untuk membuat prediksi iklim. Di India, prediksi curah hujan musiman dihitung sebagai rata-rata ansambel dari beberapa model terbaik dari semua model yang mungkin dibangun, misalnya menggunakan dua metode statistik, yaitu teknik Multiple Regression (MR) dan Projection Pursuit Regression (PPR), sebuah teknik regresi nonlinier (IMD, t.t.). Di Amerika, National Weather Services (NWS), Climate Prediction Center (CPC) dalam memprediksi jangka panjang menggunakan Climate Forecast System (CFS) yang sudah merupakan model kopel laut-atmosfer. Selain itu, mereka juga menggunakan metode statistik Canonical Correlation Analysis (CCA), ENSO Composites, Optimal Climate Normal (OCN), Constructed Analouge (CA), Screening Multiple Linear Regression (SMLR) untuk mendukung prediksi musiman dan bulanan (NWS CPC, 2021). Menilik prediksi musim di Australia, Bureau of Meteorology (BoM) saat ini telah beralih dari menggunakan model statistik berdasarkan pola suhu permukaan laut (SST) menjadi sistem berbasis model dinamis yang dikenal sebagai '*Predictive Ocean Atmosphere Model for Australia* (POAMA)' untuk prediksi iklim musiman (Charles et al., 2015). Kinerja model dinamis terbukti lebih tajam, lebih andal, dan secara konsisten lebih akurat dalam cakupan wilayah yang lebih luas dibandingkan sistem prediksi statistik sebelumnya. Di Filipina, PAGASA menggunakan metode probabilitas untuk mengukur tingkat ketidakpastian dalam prediksi musim dengan menetapkan nilai numerik sebagai probabilitas kemungkinan terjadinya peristiwa cuaca dalam rentang waktu dan lokasi tertentu. Probabilitas ini biasanya dinyatakan dalam persentase, yang mencakup rentang dari 0 (peristiwa pasti tidak terjadi)–100 (peristiwa pasti terjadi), mencerminkan tingkat ketidakpastian yang berbeda (Solis, 2023).

Sementara itu, di Indonesia dengan wilayahnya yang sangat luas serta dengan segala faktor iklim yang memengaruhi curah hujan di Indonesia, membuat prediksi musim menjadi tantangan sendiri

bagi BMKG. Kedeputian Bidang Klimatologi rutin melakukan rapat prakiraan musim tingkat nasional, dua kali dalam setahun. Biasanya, rapat Prakiraan Musim Kemarau (PMK) dilakukan di sekitar awal tahun, Januari atau Februari, dan rapat Prakiraan Musim Hujan (PMH) dilakukan di sekitar pertengahan tahun, Juli atau Agustus. Pada setiap rangkaian rapat prakiraan musim, baik PMK maupun PMH, terdapat lima tahapan umum, yaitu (1) penyiapan rancangan prediksi musim, (2) pembahasan dan konsensus, (3) diseminasi informasi prediksi musim, (4) evaluasi prediksi musim, dan (5) pemutakhiran prediksi musim. Gambar 6.3 menunjukkan bagian dari keseluruhan tahapan yang dilalui untuk menghasilkan prediksi musim di BMKG. Lebih jelasnya berikut penjelasan setiap tahapan tersebut.

1) Tahap Persiapan Rancangan Prediksi Musim

Pada tahap pertama, konsep rancangan prediksi musim disiapkan oleh Bidang Analisis Variabilitas Iklim, Pusat Informasi Perubahan Iklim, Kedeputian Bidang Klimatologi BMKG. Konsep tersebut merupakan kesimpulan dari hasil pengolahan dari luaran prediksi model-model iklim, khususnya untuk parameter curah hujan yang dipakai untuk membuat prediksi musim. Selain itu, konsep prediksi musim yang disiapkan juga sudah mempertimbangkan kondisi atmosfer-laut saat prediksi dibuat serta prediksinya untuk enam bulan hingga satu tahun ke depan.

2) Tahap Pembahasan Konsep dan Konsensus Prediksi Musim

Tahapan ini bertujuan untuk mengoreksi konsep prediksi musim yang sudah disiapkan sebelumnya (pada tahap 1) berdasarkan pertimbangan ilmiah yang diyakini makin memperbaiki prediksi musim yang akan dihasilkan. Tahap kedua ini dilakukan secara berjenjang dalam beberapa forum, sebagai berikut.

- Pembahasan pertama, disebut sebagai forum internal BMKG pusat dengan melibatkan Kedeputian Bidang Klimatologi, Meteorologi, Litbang BMKG, dan STMKG.

- b) Pembahasan kedua, disebut sebagai National Climate Expert Forum (NCEF), melibatkan para ahli iklim dari luar BMKG, seperti dari kelompok-kelompok riset bidang iklim di BRIN, serta akademisi bidang iklim dari ITB dan IPB. Pembahasan ini menghasilkan rekomendasi umum terhadap kondisi iklim global terkini dan yang akan terjadi pada beberapa bulan mendatang, serta dampak kondisi tersebut terhadap curah hujan di Indonesia.
- c) Pembahasan ketiga, disebut sebagai forum internal BMKG nasional. Kegiatan ini merupakan puncak dari rangkaian tahap kedua di mana pada bagian ini diadakan pertemuan antara prakirawan cuaca (*forecaster*) dari BMKG pusat dengan prakirawan cuaca (*forecaster*) dari UPT BMKG dari 34 provinsi di Indonesia. Tujuan dari pembahasan ketiga ini adalah menyepakati prediksi musim nasional berdasarkan saran dan masukan yang telah dilalui pada pembahasan forum internal BMKG pusat dan NCEF. Hasil dari pembahasan ketiga ini menjadi konsensus akhir prediksi musim yang selanjutnya dipakai sebagai kesepakatan nasional dan dirilis kepada publik dan pengguna informasi prediksi musim.

3) Tahapan Diseminasi Prediksi Musim

Tahapan ini dilakukan dalam suatu forum yang disebut sebagai National Climate User Forum (NCUF). Pada forum ini diadakan pertemuan antara BMKG dengan para pengguna informasi prediksi musim dari berbagai kalangan, baik dari pemerintah, seperti Kementerian Pertanian, Kementerian Perdagangan, Kementerian Kesehatan, Kementerian PUPR, Bappenas, dan Bapanas maupun dari pihak nonpemerintah, seperti petani garam, kopi, dan tembakau. Setelah tahapan NCUF, biasanya diikuti dengan rilis ke media atau *press conference* Informasi Prakiraan Musim yang juga merupakan bagian penting dari keseluruhan rangkaian tahapan nasional pembuatan prediksi musim. Melalui *press conference* ini hasil prediksi musim disebarluaskan secara masif melalui kanal media cetak nasional, elektronik nasional, dan media sosial BMKG.

4) Tahapan Evaluasi Prediksi Musim

Tahapan ini ditujukan untuk mengevaluasi seberapa akurat prediksi musim yang sudah dibuat dan sebarluaskan sebelumnya kepada publik. Evaluasi prediksi musim dilakukan berkala tiap dasarian dengan memantau perkembangan musim yang sedang terjadi pada 699 ZOM. Misalnya jika telah diprediksikan Awal Musim Kemarau di ZOM100 pada Agt III (Agustus dasarian ke-3), perlu dilakukan pengecekan berdasarkan data pengamatan di lapangan, apakah curah hujan di ZOM100 sudah memasuki musim kemarau tepat pada Agt III sehingga dapat dikatakan prediksi musim TEPAT atau MENYIMPANG. Akan tetapi, jika hingga Agt III curah hujan di ZOM100 belum menunjukkan terjadinya musim kemarau, prediksi musim di ZOM100 perlu dimutakhirkan menggunakan inisial prediksi musim terbaru dari luaran model iklim global.



Sumber: Juknis Pemutakhiran Metode Prediksi Musim (2003)

Gambar 6.3 Tahapan Penyiapan Konsep, Tahapan Pembahasan Prediksi Musim, hingga Tahapan Penyebaran Informasi Prediksi Musim ke Publik dan Pengguna

5) Tahapan Pemutakhiran Prediksi Musim

Pemutakhiran prediksi musim dilakukan dua kali setahun, tepatnya sekitar dua atau tiga bulan setelah prediksi musim dirilis ke publik. Misalnya PMK 2023 dirilis ke publik pada awal Maret 2023 maka di sekitar awal Mei dilakukan pemutakhiran prediksi musim. Pemutakhiran dilakukan atas dasar perkembangan terkini kondisi atmosfer-laut yang memengaruhi iklim di Indonesia pada beberapa bulan mendatang, khususnya parameter iklim yang berdampak pada penambahan atau pengurangan curah hujan. Pemutakhiran tidak dilakukan pada keseluruhan ZOM, tetapi hanya pada ZOM yang teridentifikasi harus di mutakhirkan prediksinya, dengan syarat dan kondisi yang dibahas dalam diskusi secara berkelanjutan antara prakirawan cuaca (*forecaster*) di BMKG pusat dan *forecaster* yang menjadi penanggung jawab (*focal point*) di UPT BMKG tingkat provinsi.

D. Ketentuan Teknis Pembuatan Prediksi Musim di BMKG

1. Parameter Musim

BMKG memantau perkembangan musim dan membuat prediksi musim pada 699 ZOM. Seperti dijelaskan sebelumnya pada Tabel 6.1, dari 699 ZOM terdapat 113 ZOM yang dikelompokkan sebagai ZOM dengan tipe satu musim. Secara klimatologi ZOM dengan tipe satu musim mempunyai curah hujan dasarian yang selalu menunjukkan periode musim kemarau atau periode musim hujan sepanjang tahun. Dengan kata lain, rata-rata selama periode 1991–2020 menunjukkan curah hujan tiap dasarian di ZOM tersebut selalu lebih dari 50 mm perdasarian, atau sebaliknya selalu kurang dari 50 mm per dasarian. Sementara itu, pada ZOM dengan tipe lebih dari satu musim, dalam satu tahun bisa terdapat dua musim (satu periode MK dan satu periode MH) atau empat musim (dua periode MK dan dua periode MH). Menurut BMKG, definisi musim didasarkan pada jumlah curah hujan perdasarian. Dasarian merujuk pada rentang waktu selama sepuluh hari. Oleh karena itu, satu bulan dibagi menjadi tiga dasa-

rian, yaitu Dasarian I yang mencakup periode 10 hari pertama pada bulan tersebut (tanggal 1–tanggal 10), Dasarian II yang mencakup 10 hari kedua (tanggal 11–20), dan Dasarian III yang mencakup 10 hari terakhir bulan tersebut (tanggal 21–akhir bulan).

Secara operasional, BMKG menggunakan definisi untuk satu periode musim dengan mengacu pada dua syarat yang telah ditetapkan. Pertama, untuk memperoleh klasifikasi musim hujan atau musim kemarau, dibutuhkan keberadaan minimal tiga dasarian berturut-turut dengan curah hujan yang melebihi ambang batas 50 mm perdasarian (Wati et al., 2019). Kedua, dalam menentukan perbedaan antara musim hujan dan musim kemarau, BMKG mengadopsi pendekatan berdasarkan jumlah total curah hujan selama tiga dasarian berturut-turut. Apabila jumlah curah hujan dalam tiga dasarian tersebut melebihi 150 mm, akan dianggap sebagai satu periode musim hujan. Sebaliknya, jika jumlah curah hujan dalam tiga dasarian tersebut kurang dari 150 mm, akan dianggap sebagai satu periode musim kemarau.

Pada buku prakiraan musim terbaru (BMKG, 2023), setidaknya ada lima parameter musim yang sifatnya wajib untuk dipantau dan diprediksi, sebagai berikut.

1) Awal musim

Awal musim kemarau, ditetapkan berdasarkan jumlah curah hujan dalam satu dasarian (10 hari) kurang dari 50 milimeter dan diikuti oleh dua dasarian berikutnya. Permulaan musim kemarau bisa terjadi lebih awal (maju), sama, atau lebih lambat (mundur) dari kondisi normal. Sementara itu, awal musim hujan ditetapkan berdasar jumlah curah hujan dalam satu dasarian (10 hari) sama atau lebih dari 50 milimeter dan diikuti oleh dua dasarian berikutnya. Permulaan musim hujan bisa terjadi lebih awal (maju), sama, atau lebih lambat (mundur) dari normal.

2) Perbandingan Awal Musim terhadap Normal

Perbandingan awal musim terhadap normal (rata-rata curah hujan periode 1991–2020) ditetapkan dengan menghitung selisih dasarian

antara prakiraan awal musim dengan normal awal musim. Informasi ini dibagi menjadi tiga kategori.

- a) Maju: jika prakiraan awal musim terjadi lebih awal dibandingkan normal awal musim.
 - b) Sama: jika prakiraan awal musim sama dengan normal awal musim.
 - c) Mundur: jika prakiraan awal musim terjadi lebih terlambat dibandingkan normal awal musim.
- 3) Sifat musim

Sifat hujan, merupakan perbandingan antara jumlah curah hujan selama rentang waktu yang ditetapkan (minimal satu periode musim hujan atau satu periode musim kemarau) terhadap jumlah curah hujan normal pada rentang yang sama. Sifat hujan dibagi menjadi tiga katagori.

- a) Atas Normal (AN): jika nilai curah hujan lebih dari 115% terhadap normal.
 - b) Normal (N): jika nilai curah hujan antara 85%–115% terhadap normal.
 - c) Bawah Normal (BN): jika nilai curah hujan kurang dari 85% terhadap normal.
- 4) Puncak musim

Puncak musim hujan merupakan periode di mana terdapat jumlah curah hujan tertinggi untuk akumulasi tiga dasarian berturut-turut. Jika tiga dasarian tersebut berada pada bulan yang berbeda, bulan yang dinyatakan sebagai puncak musim hujan adalah disebutkan bulan dengan dua dari tiga dasarian yang diperoleh. Sebaliknya, puncak musim kemarau merupakan periode dengan jumlah curah hujan terendah untuk akumulasi tiga dasarian berturut-turut. Jika terdapat minimal tiga dasarian bernilai 150 mm, bulan yang dinyatakan sebagai puncak musim kemarau diambil di tengah periode tersebut. Sementara itu, perbandingan puncak musim terhadap normal ditetap-

kan dengan menghitung selisih bulan antara prakiraan puncak musim dengan normal puncak musim yang dibagi menjadi tiga kategori.

- a) Maju: jika prakiraan puncak musim terjadi lebih awal dibandingkan normal puncak musim.
- b) Sama: jika prakiraan puncak musim sama dengan normal puncak musim.
- c) Mundur: jika prakiraan puncak musim terjadi lebih terlambat dibandingkan normal puncak musim.

5) Durasi musim

Selain parameter yang sudah disebutkan di atas, sejak tahun 2023 ada parameter baru yang menjadi turunan dari penentuan awal musim dan akhir musim, yaitu durasi musim dan perbandingannya terhadap normal. Durasi musim merupakan jumlah dasarian dalam satu periode musim. Durasi musim dihitung dengan menentukan dahulu awal musim dan akhir musim dalam satu musim. Selang dasarian antara akhir musim dan awal musim disebut sebagai durasi musim. Durasi musim terbagi dalam delapan kelompok berdasarkan jumlah dasarian, yaitu 1–4 dasarian, 5–8, 13–15, 16–20, 21–24, 25–28, dan lebih dari 28 dasarian. Kemudian, perbandingan durasi musim terhadap normal ditetapkan dengan menghitung selisih dasarian prakiraan durasi musim dengan normal durasi musim yang dibagi dalam tiga kategori.

- a) Lebih pendek: jika prakiraan durasi musim terjadi lebih pendek dibandingkan normal durasi musim.
- b) Sama: jika prakiraan durasi musim sama panjang dengan normal durasi musim.
- c) Lebih panjang: jika prakiraan durasi musim terjadi lebih panjang dibandingkan normal durasi musim.

2. Alur Teknis Prediksi Musim di BMKG Pusat

a. Penyiapan Rancangan dan Konsensus Prediksi Musim

Penyiapan rancangan prediksi musim menggunakan pendekatan *robustness* atau kesepakatan terbaik model. Konsep ini mengukur

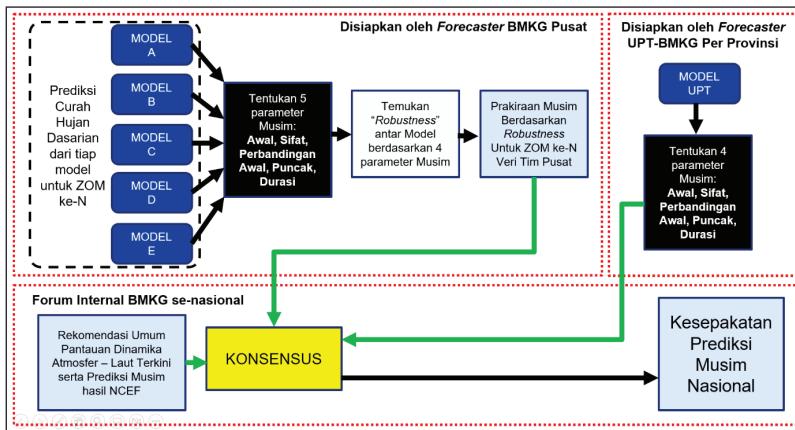
seberapa banyak model yang sepakat dalam memprediksi tiap parameter musim. Gambar 6.4 adalah ilustrasi tahapan penyiapan konsep prediksi musim hingga tahap pembahasan dalam forum internal BMKG tingkat nasional. Secara umum ada tiga bagian (kotak merah), diawali dari bagian pertama, yaitu penyiapan konsep oleh *forecaster* BMKG pusat, tepatnya di Bidang Analisis Variabilitas Iklim, Pusat Informasi Perubahan Iklim, Kedeputian Bidang Klimatologi. Pada bagian ini, *forecaster* menyiapkan prediksi curah hujan dasarian dari beberapa model untuk 699 ZOM. Selanjutnya, dari prediksi curah hujan dasarian pada tiap model dan tiap ZOM dengan tipe dua musim atau lebih, diturunkan menjadi parameter musim, yaitu Awal Musim, Perbandingan terhadap Normal, Sifat Musim, Puncak Musim dan Durasi Musim. Kemudian, dari masing-masing parameter tersebut dicari *robustness* antarmodel sehingga diperoleh kecenderungan dari semua model. Secara teknis, pada tiap ZOM, pendekatan *robustness* mengikuti langkah-langkah berikut.

- 1) Tentukan parameter musim dari masing-masing model.
- 2) Tentukan modus atau frekuensi terbanyak dari tiap parameter.
- 3) Hitunglah seberapa banyak model yang terpilih modus tersebut.
 - a) Jika hanya ditemukan satu modus maka disebutkan di *Robustness 1*.
 - b) Jika ditemukan dua modus dengan jumlah model (langkah 3) yang sama maka disebutkan di *Robustness 1* dan *Robustness 2*.

Sebagai contoh pada ZOM100, lima dari delapan model menunjukkan prediksi Awal Musim kemarau pada Jun III (Juni dasarian III) maka berdasarkan *robustness* untuk Awal Musim pada ZOM1920 dipilih pada Jun III. Hal yang serupa dilakukan untuk mencari arah *robustness* pada tiap parameter musim untuk tiap ZOM. Khusus untuk ZOM dengan tipe satu musim, hanya parameter musim Sifat Musim yang dihitung arah *robustness* nya.

Semua hasil yang disiapkan, seperti nilai prediksi curah hujan dasarian pada tiap model, parameter musim dari masing-masing model, dan hasil *robustness* dari masing-masing parameter musim pada tiap ZOM, disampaikan kepada *forecaster* UPT BMKG per

provinsi. Namun, pada saat bersamaan, beberapa UPT juga menyiapkan konsep prediksi musim menggunakan model-model yang selama ini mereka yakini lebih baik untuk daerah mereka saja. Pada akhirnya, UPT BMKG juga mempunyai kesimpulan parameter musim untuk provinsinya masing-masing seperti terlihat pada Gambar 6.4 (kotak merah kanan atas).



Sumber: Juknis Pemutakhiran Metode Prediksi Musim (2003)

Gambar 6.4 Ilustrasi Tahapan Penyiapan Rancangan Prediksi Musim hingga Tahap Pembahasan dalam Forum Internal BMKG pada Tingkat Nasional

Terakhir, hasil *robustness* dan hasil kesimpulan parameter musim dari *forecaster* BMKG Pusat dan *forecaster* BMKG daerah dibahas bersama dalam forum internal BMKG nasional atau dikenal sebagai istilah “konsensus”. Pada saat konsensus berlangsung, *forecaster* dari masing-masing provinsi akan menyepakati satu hasil untuk tiap parameter musim. Kesepakatan biasanya merujuk pada nilai *robustness*, tetapi terkadang juga merujuk pada nilai selain *robustness* dengan pertimbangan tertentu. Pertimbangan yang dimaksud berkaitan dengan kondisi lokal, seperti topografi, kajian kemampuan model yang digunakan pada masa lalu, dan kondisi iklim terkini di ZOM

yang sedang dibahas prediksi musimnya. Perlu dicatat juga bahwa proses konsensus tidak saja bersandar pada hasil-hasil yang sudah disiapkan oleh *forecaster* BMKG pusat ataupun UPT BMKG, akan tetapi konsensus dilakukan dengan mengikuti rekomendasi umum dari forum NCEF.

b. Model Iklim yang Dilibatkan untuk Prediksi Musim

Masukan model yang terlibat dalam pengambilan keputusan prediksi musim dibagi dalam empat kelompok, yaitu (1) *Direct Output* Model Dinamis (DO-MD), (2) *Post Processing* Model Dinamis (PP-MD), (3) Model Statistik, dan (4) Model Analogi. Total dari gabungan empat kelompok tersebut adalah 14 model serta kombinasi beberapa model dengan rincian tiap model disajikan pada Tabel 6.2.

Pada kelompok pertama DO-MD, terdapat tiga jenis model, yaitu ECMWF-SEAS5 RAW, CFSv2 RAW, dan Indonesia Regional Climate Model (InaRCM). Prediksi curah hujan dari ECMWF-SEAS5 RAW adalah luaran dari model prediksi musim dari lembaga penyedia prediksi model iklim global, ECMWF. Prediksi musim yang mereka miliki mengusung konsep Ensemble Prediction System (EPS) (Johnson et al., 2019; Molteni et al., 1996). Pada satu kali inisial prediksi, ECMWF-SEAS5 mempunyai *lead time* prediksi hingga 215 hari atau sekitar 7 bulan ke depan. Selain itu, dengan konsep EPS, model ini terdiri dari beberapa *individual forecast* yaitu sebanyak 51 *ensemble member* sehingga memungkinkan untuk dibuat prediksi curah hujan probabilistik. Resolusi spasial model ini relatif lebih baik dari model lainnya sekitar 40 km persegi mencakup daratan dan lautan. Selain luaran prediksi curah hujan, model ECMWF juga menyediakan parameter iklim lainnya, seperti prediksi Angin 850 hPa, Suhu Muka Laut, Suhu Udara Permukaan (t2m) yang bisa digunakan sebagai gambaran prediksi kondisi atmosfer-laut pada beberapa waktu mendatang. Selanjutnya, CFSv2 adalah model prediksi musim dari CPC NOAA, Amerika Serikat. Kelebihan model ini mempunyai jangkauan hingga hampir 10 bulan ke depan dengan resolusi spasial sekitar 100 km persegi (Saha et al., 2014). Konsep ansambel (*ensemble*) dari model

ini mengusung ansembel jeda waktu (*lag-time ensemble*), sekitar 20–24 inisial prediksi gabung menjadi satu membentuk *ensemble member*, yang pada akhirnya juga bisa digunakan untuk membuat prediksi curah hujan probabilistik. Terakhir, InaRCM adalah regional model yang secara mandiri dijalankan oleh bagian Litbang BMKG. InaRCM ini memiliki resolusi spasial sekitar 20 km persegi mencakup seluruh daratan dan lautan di sekitar Indonesia. Saat ini, InaRCM belum dibangun dalam bentuk prediksi ansambel (*ensemble forecast*) sehingga masih berupa prediksi tunggal dan dapat dimanfaatkan untuk prediksi curah hujan deterministik saja.

Pada kelompok PP-MD, terdapat empat jenis model, yaitu ECMWF-SEAS5 COR, CFSv2 COR, InaMME1, InaMME2. ECMWF-SEAS5 COR dan CFSv2 COR berasal dari model yang sama dengan kelompok pertama DO-MD, akan tetapi telah dilakukan *post-processing*, menggunakan metode koreksi bias untuk mendapatkan prediksi yang lebih mendekati nilai pengamatan hujan di lapangan (Ratri et al., 2019). Metode koreksi bias yang dipakai adalah *linear scaling* (LS) (Lafon et al., 2013). Metode ini mengoreksi rata-rata DO-MD terhadap rata-rata nilai pengamatan sebenarnya. Singkatnya, untuk mendapatkan prediksi curah hujan terkoreksi pada bulan ke-*m* maka dicari terlebih dahulu hubungan antara *mean* observasi dan *mean* model untuk bulan ke-*m* tersebut berdasarkan pengamatan dan prediksi curah hujan DO-MD pada masa lalu disebut sebagai *reforecast* sehingga diperoleh suatu Faktor Koreksi (FK), kemudian mengalikan FK tersebut dengan prediksi curah hujan DO-MD terbaru pada bulan ke-*m*. Sementara itu, InaMME1 merupakan luaran *post-processing* menggunakan metode CCA, dari masukan *direct output* NMME, sedangkan InaMME2 merupakan gabungan dari InaMME1 dan ECMWF-SEAS5 COR.

Kelompok ketiga adalah model statistik. Model statistik telah lama digunakan dalam prakiraan musim (Nury et al., 2017; Thapliyal, 1997). Metode ini melibatkan analisis statistik terhadap data iklim historis untuk mengidentifikasi pola dan hubungan antara berbagai variabel iklim. Contohnya, regresi linier dapat digunakan untuk memahami bagaimana perubahan suhu permukaan laut dapat me-

mengaruhi curah hujan di suatu wilayah. Selain itu, analisis statistik juga dapat digunakan untuk membuat model musiman berdasarkan data historis. Model ini dapat mengidentifikasi siklus tahunan dalam suhu, curah hujan, atau faktor lain yang memengaruhi iklim. Dengan demikian, model statistik dapat memberikan perkiraan tentang apa yang mungkin terjadi di musim mendatang berdasarkan pola-pola sebelumnya. Model statistik yang pernah diaplikasikan di BMKG adalah model statistik menggunakan konsep *time series* analisis (ARIMA), analisis sinyal (WAVELET), dan jaringan saraf tiruan (ANFIS). Semua model tersebut terdapat dalam satu paket aplikasi yang dikenal sebagai HyBMG (Nuraini et al., 2019). HyBMG merupakan aplikasi yang dikembangkan oleh Puslitbang BMKG sejak 2007 untuk membantu *forecaster* dalam membuat prediksi jangka panjang, khususnya untuk curah hujan. Agar menambah ragam pada model statistik ini maka nilai rata-rata gabungan sari seluruh metode ARIMA, ANFIS, WAV-ARIMA, dan WAV-ANFIS juga dihitung membentuk satu nilai prediksi baru disebut sebagai ENSMEANStat1, sedangkan ENSMEANStat2, hanya tiga model dilibatkan ARIMA, AWAR-ARIMA, dan WAV-ANFIS.

Kelompok terakhir, adalah model Analogi. Model ini salah satu teknik yang telah lama populer untuk membuat prediksi pada skala cuaca (Hamill et al., 2015; Hamill & Whitaker, 2006). Model Analogi tergolong dalam teknik *statistical downscaling* sederhana yang berdasarkan pada hipotesis hubungan dua situasi pada skala *synoptic* yang sama akan menghasilkan pengaruh yang sama juga pada skala lokal (Horton et al., 2017). Pada prediksi musim di BMKG, model Analogi diterapkan dengan mencari kemiripan kondisi iklim pada beberapa waktu terkini (1–12 bulan terakhir) serta prediksinya beberapa bulan mendatang (1–6 bulan berikutnya), lalu dibandingkan kemiripannya dengan kondisi iklim pada masa lalu, misal dari 1981 hingga 2020. Kondisi iklim yang dicari kemiripannya diidentifikasi dari kecenderungan prediksi indeks NINO3.4 apakah menuju netral, El Niño, atau La Niña. Selain itu, analogi kemiripan prediksi indeks IOD apakah menuju IOD positif, IOD negatif, atau IOD netral. Saat ini, model analogi yang digunakan berdasarkan pendekatan *K-means*

Clustering yang bertujuan untuk mengelompokkan tahun-tahun yang memiliki kemiripan antara berdasarkan prediksi NINO34 dan IOD terhadap indeks NINO34 dan IOD pada masa lalu (Balsa et al., 2022).

Tabel 6.2 Model yang Digunakan dalam Pengambilan Keputusan untuk Prediksi Musim

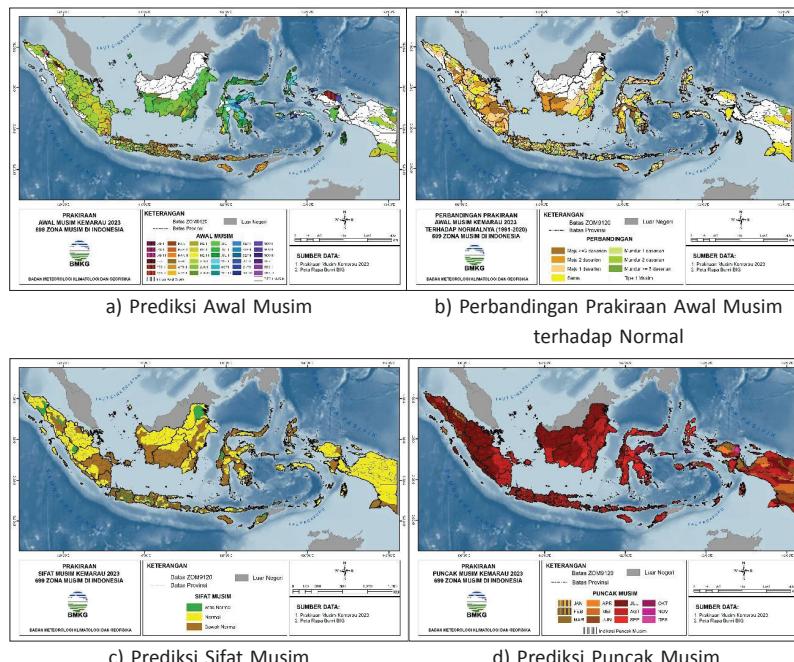
No	Jenis Model	Nama Model	Metode	Jangkauan Prediksi (Bulan)	Penyedia
1	<i>Direct Output Model</i>	ECMWF-SEASS5 RAW	-	7	ECMWF
2	<i>Post-Processing Model</i>	CFSv2 RAW	-	10	CPC NOAA
3	Dinamis	InarCML	RegCM + NoCLM	7	LITBANG BMKG
4		ECMWF-SEASS5 COR	<i>Linear Scaling</i>	7	PUSPIPER BMKG
5		CFSv2 COR	<i>Linear Scaling</i>	7	PUSPIPER BMKG
6	<i>Model Dinamis</i>	InaMME1	CCA (<i>Canonical Correlation Analysis</i>)	10	PUSPIPER BMKG
7		InaMME2	InaMME1 + ECMWF COR	7	PUSPIPER BMKG
8		HYBMG	ARIMA	12	LITBANG BMKG
9		HYBMG	WAV-ARIMA	12	LITBANG BMKG
10	Statistik	HYBMG	ANFIS	12	LITBANG BMKG
11		HYBMG	WAV-ANFIS	12	LITBANG BMKG
12		HYBMG	ENSMEANStat1	12	LITBANG BMKG
13		HYBMG	ENSMEANStat2	12	LITBANG BMKG
14	Analogi	Analogi ENSO+IOD	K-Means	12	PUSPIPER BMKG

Sumber: BMKG (2023)

c. Contoh Penyajian Informasi Prakiraan Musim Kemarau
Gambar 6.5 ini adalah contoh ragam informasi Prakiraan Musim Kemarau 2023 (PMK2023). Semua peta pada Gambar 6.5 merupakan hasil akhir dari seluruh rangkaian proses pembuatan prediksi musim.

Produk informasi ini dirilis ke publik pada Februari 2023 yang disajikan dalam *Buku Prakiraan Musim Kemarau 2023*. Di dalam buku tersebut disajikan beberapa hal, di antaranya

- 1) narasi kondisi terkini dan prediksi dinamika atmosfer-laut pada beberapa bulan mendatang,
- 2) peta prediksi musim kemarau untuk tiap provinsi,
- 3) peta prediksi musim hujan untuk beberapa ZOM yang bertipe empat musim,
- 4) tabel nilai prediksi curah hujan dasarian dari Januari–Desember 2023 pada tiap ZOM,
- 5) tabel nilai curah hujan dasarian untuk periode normal 1991–2020 pada tiap ZOM, dan
- 6) grafik pola klimatologi hujan bulanan pada tiap ZOM.



Sumber: BMKG (2023)

Gambar 6.5 Produk Informasi Prakiraan Musim Kemarau 2023

Buku ini tidak diperjualbelikan.

d. Metode dalam Pantauan Perkembangan Musim Kemarau dan Hujan

Setelah prakiraan musim dirilis ke publik maka dilakukan pantauan terhadap kondisi musim yang sedang berlangsung secara berkala tiap dasarian. Tahapan memantau perkembangan musim dimulai dengan menyiapkan analisis hujan dasarian di seluruh daratan Indonesia. Analisis curah hujan berasal dari pengamatan hujan lebih dari 4000 pos hujan di seluruh Indonesia. Pengamatan pos hujan ini berasal dari UPT BMKG per provinsi yang dikumpulkan dalam satu portal data Base BMKGSOFT. Pengamatan dari pos hujan lalu digabung dengan pengamatan hujan dari satelit GSMap, menggunakan teknik geostatistik sehingga diperoleh curah hujan dalam format raster dengan resolusi spasial sekitar $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ (BMKG, 2021b). Kemudian, dari format raster diagregasi ke unit spasial ZOM, dengan cara merata-ratakan semua grid yang terdapat pada tiap ZOM. Misal pada ZOM100 terdapat 40 grid dengan masing-masing mempunyai nilai curah hujan maka untuk mendapatkan nilai curah hujan yang mewakili ZOM 100, nilai curah hujan pada 40 grid tersebut dirata-ratakan seluruhnya. Proses ini dilakukan pada 699 ZOM dan terus-menerus setiap dasarian. Pada akhirnya dapat diketahui perkembangan kondisi iklim di setiap ZOM berdasarkan nilai curah hujan dasarian.

Keputusan untuk menyatakan sudah dimulai atau belum awal musim di ZOM diamati berdasarkan *threshold* 50 mm perdasarian (Wati et al., 2019). Misalkan untuk musim kemarau, pada dasarian ke- t , curah hujan pada suatu ZOM sudah menunjukkan nilai kurang dari 50 mm, artinya ZOM tersebut sudah terindikasi akan mengalami musim kemarau dimulai pada dasarian ke- t . Namun, keputusan untuk menyatakan ZOM tersebut sudah mengalami musim kemarau masih memerlukan dua dasarian berikutnya. Ada tiga kondisi yang biasanya ditemukan pada saat pengambilan keputusan untuk menyatakan musim kemarau.

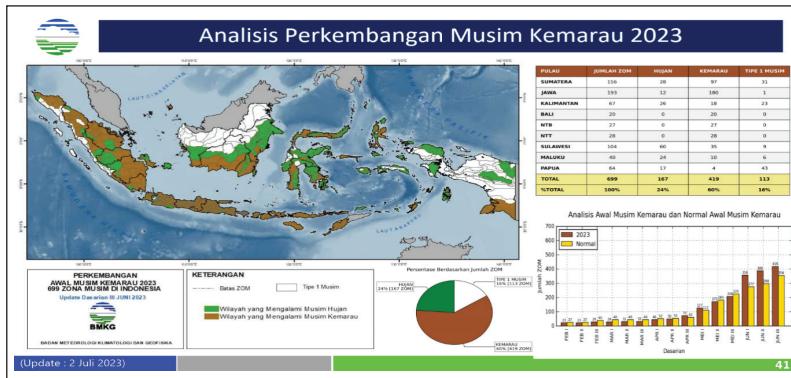
- 1) Jika nilai curah hujan yang teramati pada dua dasarian berikutnya, $t+1$ dan $t+2$ kurang dari 50 mm, dengan jelas dapat nyatakan awal musim kemarau dimulai pada dasarian ke- t . Kondisi pertama

- ini diutamakan untuk dijadikan syarat penentuan awal musim kemarau, namun jika tidak ditemukan kondisi pertama ini maka diperbolehkan memilih salah satu dari kondisi 2 dan 3 tergantung yang mana memenuhi syarat terlebih dahulu.
- 2) Jika nilai curah hujan yang teramati pada satu dasarian berikutnya, $t+1$ sedikit di atas 50 mm, perlu menunggu nilai curah hujan pada dasarian berikutnya, $t+2$. Pada saat telah diperoleh nilai curah hujan pada $t+2$ maka dimungkinkan pada dua kondisi, yaitu nilai $t+2$ lebih dari 50 mm atau kurang dari 50 mm. Oleh karena itu, perlu dijumlahkan nilai $t + t+1 + t+2$, jika total nilai ketiganya kurang dari 150 mm, dapat nyatakan awal musim kemarau dimulai pada dasarian ke- t , namun jika lebih dari 150 mm maka dasarian ke- t batal menjadi awal musim kemarau.
 - 3) Jika nilai curah hujan yang teramati pada satu dasarian berikutnya, $t+1$ kurang dari 50 mm, indikasi awal musim kemarau sudah makin menguat, akan tetapi masih perlu menunggu nilai curah hujan pada dasarian berikutnya, $t+2$. Pada saat telah diperoleh nilai curah hujan pada $t+2$ maka dimungkinkan pada dua kondisi, yaitu nilai $t+2$ lebih dari 50 mm atau kurang dari 50 mm, oleh karena itu perlu dijumlahkan nilai $t + t+1 + t+2$, jika total nilai ketiganya kurang dari 150 mm, dapat dinyatakan awal musim kemarau dimulai pada dasarian ke- t , namun jika lebih dari 150 mm maka dasarian ke- t batal menjadi awal musim kemarau.

Apabila dasarian ke- t batal ditetapkan menjadi awal musim kemarau maka proses yang sama diulangi kembali namun pengecekan digeser ke dasarian $t+1$, kemudian dilanjutkan mengecek nilai curah hujan dasarian pada $t+2$ dan $t+3$. Hal yang sama dilakukan pada pengambilan keputusan untuk menentukan awal musim hujan. Perbedaannya terdapat pada jumlah curah hujan yang dimonitor adalah lebih dari 50 mm perdasarian untuk tiga dasarian berurutan atau jumlah ketiganya lebih dari 150 mm.

Agar memudahkan pemahaman tentang pemantauan perkembangan musim, pada Gambar 6.6 disajikan contoh peta perkembangan

Musim Kemarau 2023 yang dirilis pada awal Juli 2023, untuk pemantauan berdasarkan data terakhir Juni dasarian III, 2023 (Jun III). Warna cokelat pada peta menunjukkan ZOM yang sudah memasuki musim kemarau, sedangkan warna hijau adalah ZOM yang belum memasuki kemarau atau masih mengalami musim hujan. Hingga Jun III, 60% atau 419 ZOM dari 699 ZOM sudah memasuki musim kemarau yang tersebar di berbagai pulau di Indonesia. Sebagai contoh, semua ZOM di kepulauan Bali dan Nusa tenggara, sudah memasuki musim kemarau, sedangkan di pulau Jawa, 180 dari 193 ZOM juga sudah memasuki musim kemarau. Pada peta tersebut juga diketahui bahwa 113 ZOM dari 699 ZOM adalah ZOM tipe satu musim sehingga tidak dilakukan pemantauan perkembangan awal musim di ZOM tersebut. Selanjutnya, pada Gambar 6.6 juga disertakan pemantauan perbandingan kondisi kemarau terhadap kondisi normal yang disajikan pada grafik batang pada bagian kanan bawah. Grafik tersebut menampilkan perbandingan akumulasi jumlah ZOM yang sudah memasuki musim kemarau antara kondisi saat ini dengan kondisi normal dari Januari I–Juni III. Mulai dari Januari I–Mei III, perkembangan kondisi kemarau 2023 relatif mirip dengan kondisi normalnya, namun pada Jun I–Jun III, terdapat perbedaan cukup signifikan yang menunjukkan pada tahun 2023 jumlah ZOM yang sudah memasuki musim kemarau cenderung lebih banyak dari kondisi normal.



Keterangan: Dikutip dari paparan rutin “Analisis Dinamika Atmosfer Laut; Analisis dan Prediksi Curah Hujan”, Pemutakhiran Dasarian III Juni 2023, Bidang Analisis Variabilitas Iklim, Pusat Informasi Perubahan Iklim (Puspiper), BMKG
 Sumber: BMKG (2023)

Gambar 6.6 Pemantauan Perkembangan Musim Kemarau 2023 pada 699 ZOM di Indonesia

E. Pemutakhiran Prediksi Musim

1. Alasan Pemutakhiran Prediksi Musim

Prediksi musim dibuat berdasarkan pemahaman terhadap kondisi atmosfer-laut yang terus berubah pada skala submusiman hingga musiman. Pada skala musiman, ENSO adalah faktor yang punya dampak langsung terhadap curah hujan di Indonesia (Supari et al., 2018). ENSO fase hangat atau yang lebih populer dikenal sebagai El Niño adalah kondisi yang ditandai dengan adanya peningkatan SST di Samudra Pasifik tropis bagian tengah, sedangkan ENSO fase dingin atau La Niña adalah kondisi yang ditandai adanya SST di Pasifik yang relatif lebih dingin dibandingkan rata-ratanya. Kedua fase ENSO tersebut memengaruhi pola pergerakan udara dari Samudra Pasifik menuju Indonesia (dikenal dengan istilah *sirkulasi Walker*) sehingga kemudian akan memengaruhi distribusi curah hujan dan suhu udara di seluruh wilayah Indonesia. Kemudian, pada skala submusiman fenomena MJO, Gelombang Ekuator, daerah pertemuan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

angin (konvergensi), atau anomali Suhu Muka Laut sekitar Indonesia ikut memengaruhi perubahan curah hujan di Indonesia dalam waktu singkat (Diong et al., 2023; Latos et al., 2021; Permana & Supari, 2021).

Oleh karena itu, sering teramat meskipun suatu ZOM sudah memasuki musim kemarau, masih dimungkinkan untuk terjadinya hujan dalam periode singkat misalnya dalam satu minggu atau satu dasarian. Akibatnya satu kali inisial prediksi dari banyak model iklim tidak cukup untuk mengakomodasi ketidakpastian yang akan terjadi pada beberapa bulan mendatang, khususnya keragaman curah hujan di Indonesia. Meskipun model prediksi musim yang digunakan punya jangkauan 7–12 bulan, akan tetapi secara teori akurasi suatu model iklim juga akan menurun seiring makin jauh target waktu yang diprediksikan (Ratri et al., 2023). Akurasi model iklim cenderung menurun seiring makin jauhnya target waktu yang diprediksi karena makin jauh ke depan dalam waktu, makin banyak faktor-faktor yang dapat memengaruhi iklim yang menjadi tidak pasti.

Meskipun model prediksi musim memiliki jangkauan 7–12 bulan, banyak variabel iklim, seperti perubahan suhu permukaan laut, pola angin, dan fenomena iklim global, seperti El Niño, dapat berubah dengan cepat dan tidak selalu dapat diprediksi dengan akurat dalam jangka waktu yang sangat jauh ke depan. Hal ini membuat prediksi musim untuk jangka waktu yang lebih lama menjadi lebih tidak pasti. Selain itu, makin jauh ke depan dalam waktu, kesalahan dalam pengukuran awal atau ketidakpastian dalam data input model juga dapat mengakumulasi, menghasilkan ketidakpastian yang lebih besar dalam prediksi iklim. Meski demikian, model prediksi musim tetap berharga dalam memberikan pandangan umum tentang apa yang mungkin terjadi dalam jangka panjang, yang dapat membantu dalam perencanaan dan pengambilan keputusan. Namun, penting untuk selalu mempertimbangkan tingkat ketidakpastian yang lebih besar ketika menggunakan prediksi iklim untuk jangka waktu yang lebih jauh ke depan.

Oleh karena itu, setelah dilakukan pemantauan perkembangan kondisi iklim secara berkala tiap dasarian maka perlu dilakukan

pemutakhiran prediksi musim berdasarkan inisial prediksi terbaru. Pemutakhiran ini ditujukan untuk memperbarui ZOM yang belum mengalami awal musim namun diasumsikan prediksi dari inisial sebelumnya tidak tepat. Secara teknis, keputusan dimutakhirkankan atau tidak suatu ZOM menjadi konsensus bersama antara *forecaster* BMKG pusat dan *forecaster* UPT BMKG perprovinsi.

2. Contoh Mekanisme Pemutakhiran Prakiraan Musim Kemarau 2023

BMKG mengeluarkan PMK 2023 yang dirilis pada bulan Februari 2023. Semua model yang digunakan untuk pada PMK2023 tersebut berasal dari inisial prediksi pada bulan Januari 2023 sehingga dapat disebut sebagai 'PMK2023 inisial Jan'.

Berdasarkan analisis perkembangan musim yang dipantau secara berkala setiap dasarian terdapat ZOM yang seharusnya sudah memasuki kemarau berdasarkan informasi yang dibuat, namun di wilayah tersebut masih mengalami musim hujan. Oleh karena itu, guna mengakomodasi perubahan kondisi dinamika atmosfer-laut yang berdampak pada musim di Indonesia, BMKG perlu melakukan pemutakhiran informasi prakiraan musim tersebut. Dalam melakukan pemutakhiran PMK 2023, ada beberapa syarat dan ketentuan yang harus terpenuhi oleh tiap ZOM, mengingat keragaman iklim di wilayah Indonesia yang sangat tinggi sehingga tidak semua ZOM perlu dilakukan pemutakhiran. Berikut adalah syarat dan ketentuan yang harus dipenuhi oleh suatu ZOM agar dapat dimutakhirkankan.

- 1) ZOM merupakan tipe lebih dari satu musim.
- 2) Hasil pemantauan perkembangan musim hingga dasarian III April 2023, ZOM tersebut masih mengalami musim hujan.
- 3) ZOM-ZOM yang telah diprakirakan awal musimnya hingga April I berdasarkan PMK 2023 inisial Januari, akan tetapi pantauan pada di April III, ZOM-ZOM tersebut belum masuk musim kemarau.
- 4) Berdasarkan pemantauan perkembangan musim hingga April III, ZOM tersebut masih belum masuk musim kemarau sama sekali. Kemudian, diyakini PMK2023 inisial April, PMK yang

dijalankan dari inisial prediksi terbaru, dianggap lebih tepat maka ZOM tersebut perlu dimutakhirkan, dengan syarat selisih prakiraan awal MK antara inisial Januari dan inisial April harus lebih dari dua dasarian. Sebagai contoh pada ZOM100, prakiraan awal musim kemarau dari inisial Januari akan terjadi pada Mei II, kemudian inisial April menunjukkan prakiraan awal musim akan terjadi pada Jun II (lebih dari 2 dasarian).

- 5) ZOM yang tidak memiliki awal musim kemarau (masih mengalami musim hujan) pada inisial Januari maka perlu dimutakhirkan dengan hasil prakiraan terbaru.

Tabel 6.3 adalah contoh hasil pemutakhiran PMK2023 inisial Januari menggunakan inisial April 2023. Jumlah ZOM yang di mutakhirkan beragam bergantung pada parameter musim yang menjadi perhatian. Sebagai contoh, awal musim dimutakhirkan pada 29 ZOM, sedangkan puncak musim dimutakhirkan pada 67 ZOM.

Tabel 6.3 Contoh Sebaran Jumlah ZOM pada Tiap Pulau Besar yang dimutakhirkan untuk PMK 2023

Pulau	AMK	Perban-dingan AMK	Sifat	Puncak	Perban-dingan Puncak	Durasi	Perban-dingan Durasi
Sumatra	10	10	22	21	21	29	29
Jawa	1	1	0	0	0	0	0
Kalimantan	1	1	2	4	4	9	9
Bali	0	0	0	0	0	0	0
NTB	4	4	4	5	5	10	10
NTT	4	4	11	14	14	19	19
Sulawesi	6	6	8	21	21	18	18
Maluku	1	1	1	1	1	1	1
Papua	2	2	0	1	1	1	1
Total	29	29	48	67	67	87	87

Sumber: BMKG (2023)

F. Penutup

Dalam operasional analisis dan prediksi musim di BMKG, digunakan Zona Musim (ZOM) sebagai unit spasial untuk menggambarkan

kemiripan pola hujan di suatu wilayah. Berdasarkan pemutakhiran terbaru data rata-rata hujan 1991–2020, saat ini terdapat 699 ZOM di Indonesia. Pada 699 ZOM ini secara rutin dilakukan analisis dan prediksi musim hujan dan kemarau. Ada lima tahapan umum dalam proses pembuatan prediksi musim, yaitu (1) penyiapan rancangan prediksi musim, (2) pembahasan dan konsensus, (3) diseminasi informasi prediksi musim, (4) evaluasi prediksi musim, dan (5) pemutakhiran prediksi musim.

Pada tahap awal dalam menyiapkan rancangan prediksi musim, total ada 14 model dan kombinasi antarmodel, yang digunakan untuk pengambilan keputusan prediksi musim. Semua model tersebut dapat dikelompokkan menjadi empat kategori, yaitu Direct Output Model Dinamis (DO-MD), Post Processing Model Dinamis (PP-MD), Model Statistik, dan Model Analogi. Pada kelompok DO-MD, terdapat tiga jenis model yang digunakan, seperti ECMWF-SEAS5 RAW, CFSv2 RAW, dan InaRCM, masing-masing dengan karakteristik dan resolusi spasial yang berbeda. Kelompok PP-MD mencakup model-model yang telah dilakukan *post-processing*, yaitu ECMWF-COR dan CFSv2-COR untuk mendapatkan prediksi yang lebih mendekati nilai pengamatan hujan di lapangan. Model statistik ini melibatkan analisis statistik berbasis *time series* dan analisis sinyal yaitu ARIMA, ANFIS, WAVELET. Model statistik ini bekerja berdasarkan data iklim historis untuk memprediksi kejadian hujan di waktu yang akan datang. Terakhir, ada model Analogi yang mencari kemiripan kondisi iklim saat ini dan prediksi beberapa waktu mendatang dengan kondisi iklim pada masa lalu. Saat ini, model Analogi berdasarkan pendekatan *K-means Clustering* digunakan untuk mengelompokkan tahun-tahun dengan kemiripan prediksi indeks NINO3.4 dan IOD.

Pada umumnya, ragam model yang dipakai untuk membangun prediksi musim di BMKG memiliki jangkauan hingga 7–12 bulan ke depan. Perlu disadari juga bahwa akurasi model tersebut cenderung menurun seiring makin jauh target waktu yang diprediksi. Ini disebabkan oleh banyak faktor yang dapat memengaruhi iklim di Indonesia, baik spasial maupun temporal. Oleh karena itu, penting

untuk selalu memperhitungkan tingkat ketidakpastian yang lebih besar ketika menggunakan prediksi musim untuk jangka waktu yang lebih jauh ke depan. Dalam pemanfaatan prediksi musim, BMKG juga melakukan monitoring serta analisis terhadap perkembangan musim secara berkala tiap dasarian. Selain itu, BMKG juga melakukan pemutakhiran terhadap prediksi musim yang telah dirilis ke publik. Pemutakhiran prediksi musim penting untuk mengakomodasi perubahan kondisi dinamika atmosfer-laut yang dapat memengaruhi musim di Indonesia.

Pada setiap rilis prediksi musim, ada lima parameter musim yang selalu diprediksikan, yaitu awal musim, perbandingannya awal musim terhadap normal, sifat musim, puncak musim, durasi musim. Semua prediksi parameter musim ini dimanfaatkan oleh pengguna informasi iklim BMKG sesuai kebutuhan mereka masing-masing.

Referensi

- Aldrian, E., & Susanto, R. D. (2003). Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International Journal of Climatology*, 23(12), 1435–1452. <https://doi.org/10.1002/joc.950>.
- Balsa, C., Rodrigues, C. V., Araújo, L., & Rufino, J. (2022). Cluster-based analogue ensembles for hindcasting with multistations. *Computation*, 10(6), 91. <https://doi.org/10.3390/computation10060091>.
- BMKG. (2021a). *Buku Pemutakhiran zona musim Indonesia periode 1991–2020*. Pusat Informasi Perubahan Iklim.
- BMKG. (2021b). *Buku peta rata-rata curah hujan dan hari hujan periode 1991–2020 Indonesia*. Pusat Informasi Perubahan Iklim.
- BMKG. (2023). *Buku prakiraan musim kemarau 2023*. Pusat Informasi Perubahan Iklim.
- BMKG. (2023). *Pemutakhiran metode prediksi musim 2023*. Pusat Informasi Perubahan Iklim.
- BMKG. (2023). *Pemutakhiran zona musim 2023*. Pusat Informasi Perubahan Iklim.

- Borema, B. (1926). Maps of the mean annual and monthly rainfall in Sumatra. *Verhandelingen, Koninklijk Magnetisch En Meteorologisch Observatorium, Batavia*.
- Charles, A., Duell, R., Wang, X., & Watkins, A. (2015). Seasonal forecasting for Australia using a dynamical model: Improvements in forecast skill over the operational statistical model. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 65(3/4), 356–375. <https://doi.org/10.22499/2.6503.005>.
- Diong, J. Y., Abdullah, M. F. A. B., Permana, D., Pura, A., Lam, H., & Xavier, P. (2023). *Regional features of Boreal summer intraseasonal variability and their relationship with rainfall extremes over Southeast Asia* [Preprint]. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3039141/v1>.
- Hamill, T. M., Scheuerer, M., & Bates, G. T. (2015). Analog probabilistic precipitation forecasts using GEFS reforecasts and climatology-calibrated precipitation analyses*. *Monthly Weather Review*, 143(8), 3300–3309. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0004.1>.
- Hamill, T. M., & Whitaker, J. S. (2006). Probabilistic quantitative precipitation forecasts based on reforecast analogs: Theory and application. *Monthly Weather Review*, 134(11), 3209–3229. <https://doi.org/10.1175/MWR3237.1>.
- Horton, P., Obled, C., & Jaboyedoff, M. (2017). The analogue method for precipitation prediction: Finding better analogue situations at a subdaily time step. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7), 3307–3323. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3307-2017>.
- IMD. (t.t.). *Frequently asked Questions (FAQs) on Monsoon*. https://mausam.imd.gov.in/imd_latest/monsoonfaq.pdf
- Johnson, S. J., Stockdale, T. N., Ferranti, L., Balmaseda, M. A., Molteni, F., Magnusson, L., Tietsche, S., Decremer, D., Weisheimer, A., Balsamo, G., Keeley, S. P. E., Mogensen, K., Zuo, H., & Monge-Sanz, B. M. (2019). SEAS5: The new ECMWF seasonal forecast system. *Geoscientific Model Development*, 12(3), 1087–1117. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1087-2019>.
- Lafon, T., Dadson, S., Buys, G., & Prudhomme, C. (2013). Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: A comparison of methods: Bias Correction of Daily Precipitation Simulated by a Regional Climate Model. *International Journal of Climatology*, 33(6), 1367–1381. <https://doi.org/10.1002/joc.3518>.

- Latos, B., Lefort, T., Flatau, M. K., Flatau, P. J., Permana, D. S., Baranowski, D. B., Paski, J. A. I., Makmur, E., Sulystyo, E., Peyrillé, P., Feng, Z., Matthews, A. J., & Schmidt, J. M. (2021). Equatorial waves triggering extreme rainfall and floods in Southwest Sulawesi, Indonesia. *Monthly Weather Review*, 149(5), 1381–1401. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0262.1>.
- Mamenun, M., Pawitan, H., & Sopaheluwakan, A. (2014). Validasi dan koreksi data satelit trmm pada tiga pola hujan di Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 15(1). <https://doi.org/10.31172/jmg.v15i1.169>.
- Molteni, F., Buizza, R., Palmer, T. N., & Petroliagis, T. (1996). The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122(529), 73–119. <https://doi.org/10.1002/qj.49712252905>.
- Nuraini, T. A., Nuryanto, D. E., Komalasari, K. E., Satyaningsih, R., Fajariana, Y., Anggraeni, R., & Sopaheluwakan, A. (2019). Pengembangan model HyBMG 2.07 untuk prediksi iklim di Indonesia dengan menggunakan data Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 20(2), 101. <https://doi.org/10.31172/jmg.v20i2.610>.
- Nury, A. H., Hasan, K., & Alam, M. J. B. (2017). Comparative study of wavelet-ARIMA and wavelet-ANN models for temperature time series data in northeastern Bangladesh. *Journal of King Saud University - Science*, 29(1), 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2015.12.002>.
- NWS CPC. (2021). *Long-lead forecast tool discussion and analysis*. National Weather Service. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/long_range/tools.html
- Permana, D. S. & Supari. (2021). Impacts of the MJO on Rainfall at Different Seasons in Indonesia. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 893, Artikel 012070). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/893/1/012070>.
- Ratri, D. N., Weerts, A., Muhsaryah, R., Whan, K., Tank, A. K., Aldrian, E., & Hariadi, M. H. (2023). Calibration of ECMWF SEAS5 based streamflow forecast in Seasonal hydrological forecasting for Citarum river basin, West Java, Indonesia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 45, 101305. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101305>.

- Ratri, D. N., Whan, K., & Schmeits, M. (2019). A comparative verification of raw and bias-corrected ECMWF seasonal ensemble precipitation reforecasts in Java (Indonesia). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(8), 1709–1723. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0210.1>.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y.-T., Chuang, H., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., Van Den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., & Becker, E. (2014). The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, 27(6), 2185–2208. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>
- Slingo. (2015). Tropical meteorology and climate | Monsoon: Overview. Dalam *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (Second). Elsevier.
- Supari, Tangang, F., Salimun, E., Aldrian, E., Sopaheluwakan, A., & Juneng, L. (2018). ENSO modulation of seasonal rainfall and extremes in Indonesia. *Climate Dynamics*, 51(7–8), 2559–2580. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4028-8>.
- Solis, A. L. S. (2023). *Seasonal forecast in Philipina*. GOVPH. <https://bagong.pagasa.dost.gov.ph/climate/climate-prediction/seasonal-forecast>
- Thapliyal, V. (1997). Preliminary and final long range forecast for seasonal monsoon rainfall over India. *Journal of Arid Environments*, 36(3), 385–403. <https://doi.org/10.1006/jare.1996.0233>.
- Tjasyono, B. (1999). *Klimatologi umum*. ITB.
- Wati, T., Kusumaningtyas, S. D. A., & Aldrian, E. (2019). Study of season onset based on water requirement assessment. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 299, Artikel 012042). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/299/1/012042>.
- Winarso, P. A. (2001). *Sistem prakiraan cuaca dan iklim Indonesia*.

Bab VII

Digitalisasi untuk Prediksi Iklim dan Ketahanan Pangan Nasional

Septrial Arafat, Anita Dwy Fitria, Annisa Firdauzi, Dian Safitri, Leny Yuliyani, Rahmila Dapa

A. Implikasi Perubahan Iklim pada Ketahanan Pangan Nasional

Perubahan iklim merupakan isu global yang aktual dan mengancam berbagai sektor, tidak terkecuali bagi sektor pertanian. Suhu secara global antara tahun 2011–2020 lebih tinggi 1,1°C dibandingkan pada tahun 1850–1900. Skenario pada masa depan memperkirakan suhu akan terus mengalami peningkatan antara 2,5°C–4°C pada tahun 2020–2040 mendatang (IPCC, 2022). Kenaikan suhu secara berkala berdampak pada terganggunya siklus hidrologi. Cuaca ekstrem memengaruhi distribusi sumber daya air secara spasial. Di beberapa wilayah jumlah air melimpah akibat curah hujan yang meningkat

S. Arafat, A. D. Fitria, A. Firdauzi, D. Safitri, L. Yuliyani, & R. Dapa
Universitas Diponegoro, *e-mail*: septrialarafat@lecturer.undip.ac.id

© 2024 Editor & Penulis

Arafat, S. Fitria, A. D., Firdauzi, A., Safitri, D., Yuliyani, L., Dapa, R. (2024). Digitalisasi untuk prediksi iklim dan ketahanan pangan nasional. Dalam D. E. Nuryanto & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (195–223). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1244.c1391.
E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

tajam, sedangkan pada wilayah tertentu, risiko kekurangan sumber daya air menjadi ancaman kekeringan (Wang et al., 2022).

Curah hujan yang tidak menentu selama 20 tahun terakhir berdampak pada kegiatan budi daya di lahan pertanian. Hal tersebut telah menjadi salah satu faktor penyebab penurunan produktivitas tanaman ataupun gagal panen. Intensitas curah hujan yang tinggi menyebabkan kelebihan air dari yang dibutuhkan tanaman (surplus/ lahan jenuh air). Sebaliknya, curah hujan yang rendah juga menjadi ancaman degradasi lahan akibat kekeringan (defisit/titik layu permanen) sehingga memengaruhi intensitas dan jumlah air irigasi yang harus diberikan ke tanaman (Hermans & McLeman, 2021). Tidak menentunya curah hujan menjadi ancaman bagi ketahanan pangan nasional dan global. Sebagai contoh, rendahnya curah hujan tahun 2023 telah menyebabkan sebesar 63% wilayah Indonesia mengalami musim kemarau berkepanjangan dan menurut catatan Kementerian Pertanian seluas 27.000 ha lahan pertanian mengalami kekeringan. Hal tersebut meningkat tajam dibandingkan tahun 2022 yang hanya 2.700 ha (Rizky, 2023).

Kekeringan termasuk salah satu dampak yang banyak menimbulkan kerugian bagi sektor pertanian karena sering kali mengancam pasokan pangan dan menyebabkan ketidakstabilan pangan. Kekeringan juga merupakan salah satu tantangan utama yang dihadapi banyak negara, terutama di daerah-daerah yang bergantung pada pertanian sebagai sumber utama penghidupan. Meningkatnya frekuensi dan intensitas kekeringan akibat perubahan iklim telah mengancam ketahanan pangan dan ekonomi nasional. Contoh kasus kekeringan yang memberikan dampak cukup signifikan terhadap ketahanan pangan daerah adalah di kekeringan yang terjadi di Nusa Tenggara Timur (NTT).

Penurunan produktivitas di NTT tidak hanya terjadi karena dampak langsung perubahan suhu dan kelembapan udara terhadap perkembangan tanaman, tetapi juga karena dampak tidak langsung melalui pengaruh perubahan suhu terhadap populasi dan serangan organisme pengganggu tanaman (OPT). Jenis OPT yang dilaporkan

menyerang lahan sawah di NTT ialah hama belalang kembara. Belalang kembara (*Locusta migratoria*) adalah salah satu hama yang sangat merugikan petani di Pulau Sumba, NTT. Keberadaan belalang kembara di sawah dapat menjadi ancaman serius bagi petani yang sedang melakukan praktik budi daya tanaman pangan, khususnya tanaman padi. Berdasarkan laporan ahli serangga, serbuan hama belalang kembara di Sumba Timur sering terjadi di NTT sejak tahun 1950-an yang terjadi secara berkala setiap 10 tahun. Ahli entomologi, ekologi, dan keragaman hayati Universitas Kristen Wira Wacana Sumba memberikan laporan risetnya terkait fenomena ledakan hama belalang kembara di Sumba Timur, yang salah satu penyebabnya adalah perubahan iklim dan cuaca. Faktor lingkungan yang mendukung perkembangan hama belalang kembara adalah panas berkepanjangan dengan curah hujan yang sangat rendah.

Perkembangan hama belalang kembara di NTT telah menyebabkan petani di Sumba Timur NTT mengalami kerugian dikarenakan panen petani gagal total. Kasus ekstrem yang terjadi tahun 2022, belalang kembara tersebut telah memakan seluruh tanaman padi, jagung, dan kelapa jagung di Kecamatan Wewewa Barat dan Kecamatan Kodi Utara di Kabupaten Sumba Barat Daya. Selain itu, berdasarkan laporan petani di Sumba Timur, sebelum adanya serangan belalang kembara di lahan petani sawah seluas 76 are bisa menghasilkan 38 karung beras. Setelah adanya serangan belalang belalang kembara, petani Sumba Timur mengalami gagal panen karena tanaman padi yang terserang hama belalang habis dikonsumsi oleh belalang kembara. Beberapa tindakan dilakukan oleh pemerintah pusat dan pemerintah daerah sebagai langkah adaptasi dan mitigasi dampak perubahan iklim terhadap pertanian di NTT dengan pertimbangan adanya “outbreak” dari perkembangan belalang kembara yang terkait dengan siklus iklim dan cuaca. Dalam hal ini, diperlukan informasi prediksi cuaca dan iklim yang akuntabel untuk mendukung adaptasi dan mitigasi yang dilakukan di NTT terkait serangan hama belalang kumbara.

Kebutuhan sistem prediksi dan pemodelan iklim juga diperlukan di daerah lainnya, tidak hanya di NTT. Fenomena perubahan iklim berpengaruh besar pada sektor pertanian secara nasional, khususnya di subsistem hulu, yaitu pada sistem budi daya pertanian, di mana suhu dan ketersediaan air hujan menjadi faktor utamanya. Proses budi daya pertanian yang sangat bergantung pada iklim ini membutuhkan upaya-upaya ekstra pada adaptasi dan mitigasi, khususnya ketika menghadapi perubahan iklim yang belum bisa diprediksi secara akurat. Perubahan iklim dapat memengaruhi produksi pertanian dengan berbagai skema, sebagai berikut.

- 1) Akses terhadap sumber daya, yakni air, lahan, dan sumber daya genetik tanaman. Di wilayah kering seperti Indonesia bagian timur akses lahan terhadap air masih kurang. Hal ini akan memengaruhi pertumbuhan tanaman terhambat, selain itu juga belum banyak tanaman yang secara genetik tahan terhadap kekeringan.
- 2) Produksi pertanian, yakni meningkatnya suhu yang dapat merusak tanaman. Perubahan pola hujan yang dapat mengakibatkan kekeringan atau banjir dan peningkatan serangan hama maupun penyakit. Hal tersebut berdampak terhadap penurunan produksi pertanian.
- 3) Harga pangan, yakni terkait dengan fluktuasi dalam produksi pertanian akibat perubahan iklim yang berdampak pada harga pangan. Lonjakan harga pangan dapat membuatnya lebih sulit bagi rumah tangga dengan pendapatan terbatas untuk membeli makanan yang cukup.

Secara keseluruhan, ketiga skema tersebut berpengaruh besar terhadap ketersediaan pangan dalam rumah tangga. Pangan selalu menjadi masalah strategis dalam pembangunan, baik di tingkat global maupun nasional, karena hak setiap warga negara untuk mendapatkan makanan yang layak secara kuantitas dan kualitas, aman, dan bergizi. Menurut Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2012 tentang Pangan, “Ketahanan pangan adalah kondisi terpenuhinya pangan bagi negara sampai dengan perseorangan, yang tercermin dari tersedianya pangan yang cukup, baik jumlah maupun mutunya, aman, beragam, bergizi,

merata, dan terjangkau serta tidak bertentangan dengan agama, keyakinan, dan budaya masyarakat untuk dapat hidup sehat, aktif, dan produktif secara berkelanjutan.”

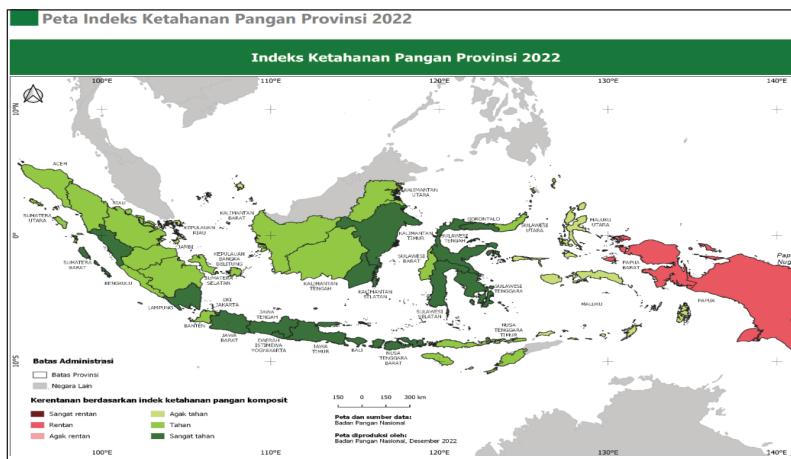
Indonesia dalam Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals, SDGs), berkomitmen untuk mewujudkan 17 target. SDGs pertama, yakni tanpa kemiskinan; yang kedua adalah mengakhiri kelaparan melalui ketercapaian pada ketahanan pangan; memperbaiki nutrisi; dan mempromosikan pertanian yang berkelanjutan sehingga pengembangan Sistem Informasi Pangan dan Gizi yang terintegrasi mutlak diperlukan. Kolaborasi lintas sektor diperlukan untuk membangun ketahanan pangan dan gizi secara sistemik. Hal ini bertujuan untuk mencapai ketersediaan pangan yang memadai melalui produksi pangan domestik dan perdagangan; mencapai stabilitas ketersediaan dan akses pangan secara makro-meso dan mikro; memenuhi kualitas (keragaman dan keamanan pangan) dan kuantitas konsumsi pangan yang didukung oleh perbaikan infrastruktur (Gambar 7.1). Melalui Gambar 7.1 terlihat bahwa Indeks Ketahanan Pangan sebagai indikator ketahanan pangan, diukur dari ketersediaan pangan, keterjangkauan pangan, dan pemanfaatannya untuk menciptakan sumber daya manusia yang sehat, aktif, dan produktif. Apabila terjadi ketidaksesuaian secara kuantitas maupun kualitas dalam pemenuhan bahan pangan, dapat mengganggu pasokan pangan rumah tangga. Ketika harga pangan melambung tinggi, hal tersebut juga mengancam ketahanan pangan rumah tangga.



Sumber: Tono et al. (2022)

Gambar 7.1 Kerangka Konsep Ketahanan Pangan

Dalam konteks ini, penggunaan aplikasi digital dan teknologi informasi telah menjadi faktor yang makin penting dalam upaya penerapan konsep ketahanan pangan. Aplikasi digital dapat memberikan berbagai manfaat, termasuk pengumpulan data yang lebih akurat, pemantauan cuaca *real-time*, pemodelan iklim, dan prediksi cuaca jangka panjang. Ini dapat dilakukan untuk mendukung semua komponen dalam ketahanan pangan. Basis data (*database*) sumber daya dan lingkungan strategis mutlak diperlukan dalam proses penilaian ketersediaan, keterjangkauan dan pemanfaatan pangan, bahkan untuk mendukung pengembangan sistem informasi status pangan dan gizi rumah tangga secara nasional. Dari hal tersebut, dapat diharapkan adanya rencana langkah-langkah adaptasi yang tepat, realistik dan sesuai dengan kondisi wilayah setempat. Pemetaan setiap tahun telah dilakukan di Indonesia untuk mendeteksi wilayah rentan terhadap keterjangkauan maupun ketersediaan pangan, seperti yang terlihat pada Gambar 7.2.



Sumber: Tono et al. (2022)

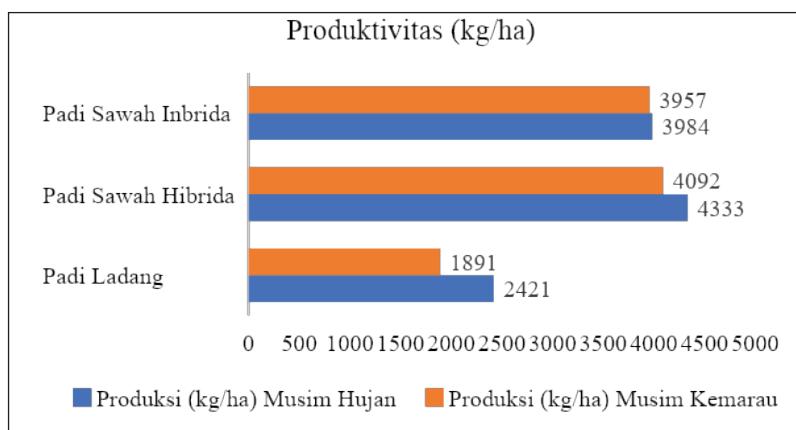
Gambar 7.2 Peta Indeks Ketahanan Pangan Provinsi 2022

B. Digitalisasi untuk Aksi Iklim

Data iklim merupakan catatan historis tentang kondisi atmosfer, lautan, dan lingkungan alam selama bertahun-tahun. Data ini mencakup parameter, seperti suhu udara, curah hujan, tekanan atmosfer, kelembapan udara, awan, dan angin. Pengumpulan dan analisis data ini memungkinkan ilmuwan untuk mengidentifikasi tren jangka panjang, perubahan musiman, dan perubahan lainnya dalam iklim global. Curah hujan merupakan salah satu unsur iklim yang sangat berpengaruh terhadap sektor pertanian. Pola distribusi hujan serta besarnya curah hujan sangat menentukan tipikal aktivitas pertanian. Keteraturan pola dan distribusi curah hujan di suatu wilayah merupakan jaminan berlangsungnya aktivitas pertanian (Estiningtyas et al., 2007).

Berdasarkan penelitian Yuliyani et al. (2023) yang mengamati efisiensi produksi pada musim kemarau dan musim hujan di mana pada musim kemarau ekstrem dan hujan berlebih menyebabkan penurunan produktifitas terutama pada pertanian padi ladang

dan pertanian padi sawah hibrida (Gambar 7.3). Apabila dampak kekeringan dan kebanjiran tidak diantisipasi, berimplikasi pada penurunan ketersediaan pangan terutama padi. Perlu ada diversifikasi pangan, tidak hanya mengandalkan tanaman padi sehingga daerah memiliki ketahanan yang kuat saat terjadi kondisi ekstrem. Selain itu, perlu adanya peramalan cuaca yang dapat diandalkan agar petani dan pemerintah dapat menstrategikan komoditas apa yang cocok untuk bulan yang akan datang dengan kondisi iklim tertentu pada bulan tersebut.



Sumber: Yuliyani et al. (2023)

Gambar 7.3 Produktivitas Tanaman Padi Menurut Komoditas pada Dua Musim Tahun 2017

Mengatasi perubahan iklim dan mencapai keberlanjutan adalah salah satu isu paling mendesak yang dihadapi dunia saat ini. Dalam hal ini, digitalisasi dapat membantu para pengambil kebijakan untuk menentukan solusi sebagai jawaban atas tantangan perubahan iklim yang terjadi. Berbagai teknologi baru, seperti sensor, *internet of things* (IoT), kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI), *big data*, dan pengindraan jauh telah membuka pintu inovasi yang menjadi sumber daya dalam melakukan mitigasi dan adaptasi perubahan iklim.

Hal ini mendorong peningkatan keakutan data dan meningkatkan kepercayaan masyarakat terhadap data, serta berpotensi mendorong peningkatan partisipasi dan pemberdayaan pemangku kepentingan. Teknologi digital menawarkan peluang di hampir semua sektor, mulai dari energi dan transportasi hingga keuangan dan investasi, termasuk sektor pertanian. Bahkan dalam sektor tertentu, penerapannya beragam, mulai dari pengumpulan data, berbagi pengetahuan hingga analisis prediktif, peramalan, dan manajemen sistem.

Menurut Brookings Institution, digitalisasi berdampak pada dinamika sosioekonomi dan bahkan lingkungan masyarakat dengan menggunakan alat-alat yang terkomputerisasi dan konsep-konsep teknologi tinggi yang inovatif serta keterampilan digital untuk mengubah pendekatan kerja konvensional (Bloomberg, 2018). Penggunaan baru sumber daya yang dikendalikan komputer sebagai pengganti pendekatan tradisional untuk praktik yang efektif, efisien, dan berkelanjutan merupakan inti dari digitalisasi (Bloomberg, 2018). Digitalisasi data iklim melestarikan pengamatan historis dan memberikan dasar untuk pemahaman yang lebih baik dan menilai variabilitas iklim, memprediksi kejadian iklim ekstrem, dan mempersiapkan diri menghadapinya (Munang, Nkem, & Han, 2013).

Menurut Makridakis et al. (1998) peramalan merupakan studi terhadap data historis untuk menemukan hubungan, kecenderungan, dan pola data yang sistematis. Peramalan iklim termasuk ke dalam analisis data longitudinal/*time series* di mana data diamati dalam periode waktu ke waktu. Pengelolaan data iklim menjadi hal yang mutlak dilakukan untuk dapat melakukan strategi yang tepat dalam melakukan adaptasi dan mitigasi dampak perubahan iklim yang potensial terjadi.

Mitigasi perubahan iklim melibatkan pengurangan dan stabilisasi emisi gas rumah kaca untuk membatasi pemanasan global. Berikut ini data-data yang relevan terkait strategi mitigasi dampak perubahan iklim.

- 1) Data emisi, yaitu data hasil pengukuran emisi gas rumah kaca yang akurat (seperti CO₂, metana, dan dinitrogen oksida) dari

- berbagai sumber (energi, transportasi, industri, pertanian). Data ini membantu melacak kemajuan dan mengidentifikasi area yang perlu diprioritaskan dalam penanganannya.
- 2) Data transisi energi, yaitu informasi mengenai konsumsi energi, penggunaan energi terbarukan, dan efisiensi energi. Data ini dapat dimanfaatkan untuk memantau peralihan dari bahan bakar fosil ke sumber energi ramah lingkungan membantu mitigasi perubahan iklim.
 - 3) Data tata guna lahan dan kehutanan, yaitu data-data yang dapat membantu memahami perubahan tata guna lahan, laju deforestasi, dan upaya penghijauan. Hutan bertindak sebagai penyerap karbon, menyerap CO₂ dari atmosfer.
 - 4) Data adaptasi dan ketahanan, yaitu data hasil penilaian strategi kerentanan dan adaptasi yang membantu masyarakat bersiap menghadapi dampak iklim. Hal ini mencakup data kejadian cuaca ekstrem, kenaikan permukaan air laut, dan perubahan pola curah hujan.
 - 5) Data ekonomi dan sosial, yaitu data proses dan hasil evaluasi biaya dan manfaat tindakan mitigasi. Hal ini mencakup aspek-aspek pembangunan ekonomi, dampak kesehatan, dan manfaat tambahan (misalnya keanekaragaman hayati, kualitas udara).
 - 6) Data berbasis alam. Selain emisi, pemahaman holistik tentang keberlanjutan juga harus mempertimbangkan solusi berbasis alam. Hal ini mencakup data mengenai jasa ekosistem, keanekaragaman hayati, dan penyerapan karbon alami.

Adapun strategi adaptasi perubahan iklim melibatkan penyesuaian terhadap kondisi iklim aktual atau yang diharapkan pada masa depan untuk mengurangi risiko dampak berbahaya perubahan iklim. Berikut adalah data-data yang relevan dengan strategi ini.

- 1) Data iklim, yaitu data model dan pengamatan terhadap atmosfer, daratan, dan lautan. Hal ini mencakup data historis, proyeksi, dan *real-time* mengenai suhu, curah hujan, kenaikan permukaan laut, peristiwa cuaca ekstrem, dan variabel iklim lainnya.

- 2) Data penilaian risiko, yaitu data untuk memahami kerentanan dan paparan terhadap risiko iklim. Hal ini mencakup data kepadatan penduduk, infrastruktur, ekosistem, dan faktor sosial ekonomi.
- 3) Data solusi teknologi dan perilaku, yaitu informasi tentang solusi yang ada (misalnya penghalang banjir, sistem peringatan dini) dan efektivitasnya. Respons perilaku masyarakat (misalnya relokasi, kesiapsiagaan bencana) juga berperan.
- 4) Data ekonomi dan kemasyarakatan, yaitu data hasil penilaian biaya, manfaat, dan pertukaran (*trade-off*) dari langkah-langkah adaptasi. Di dalamnya sudah termasuk pertimbangan manfaat tambahan, seperti pelestarian keanekaragaman hayati, peningkatan kualitas udara, dan hasil kesehatan.
- 5) Data tata kelola dan kelembagaan, yaitu data-data untuk memahami struktur tata kelola, kebijakan, dan dukungan kelembagaan untuk upaya adaptasi. Tata kelola yang efektif memastikan tindakan terkoordinasi di tingkat lokal, nasional, dan global.

Hal yang penting dalam mitigasi dan adaptasi ini adalah upaya kolaboratif yang didasari oleh data yang kuat di berbagai bidang dan didukung oleh pendekatan yang sistematis serta mempertimbangkan solusi teknologi dan penyesuaian masyarakat. Digitalisasi menjadikan hal ini lebih mudah dan efisien dengan memungkinkan interoperabilitas dan memastikan transparansi informasi dan bantuan otomatis sehingga mendukung proses pengambilan keputusan, baik itu untuk langkah mitigasi maupun untuk adaptasi.

Pada saat ini, sistem akusisi dan manajemen data iklim menunjukkan perkembangan yang signifikan. Ini terjadi karena dukungan kemajuan teknologi komputasi, teknologi radar, pengindraan jauh, dan sistem pengamatan lainnya yang memungkinkan pemantauan dalam skala wilayah yang luas secara kontinu. Kemajuan-kemajuan tersebut menciptakan potensi untuk pemetaan zona-zona iklim dan pemetaan fenomena iklim secara lebih mudah sehingga langkah-langkah mitigasi dan adaptasi menjadi lebih baik.

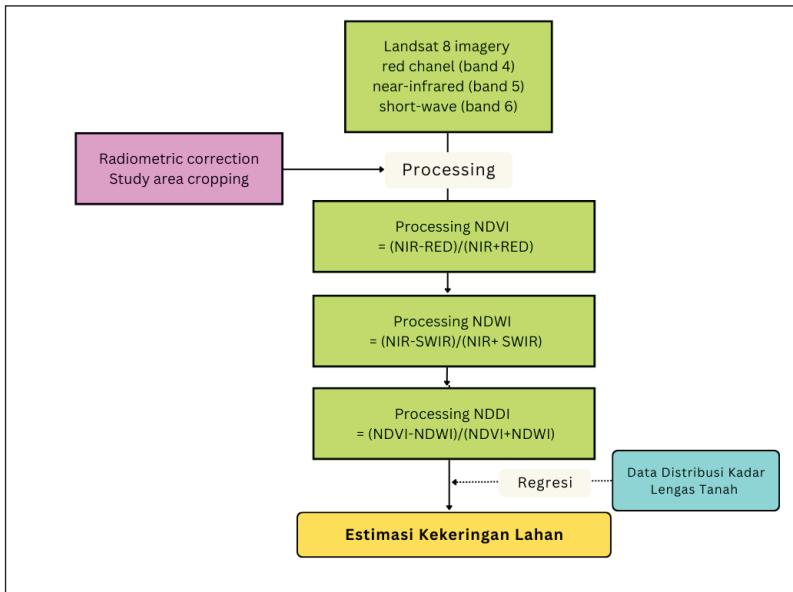
Berbagai platform pengindraan jauh berbasis ruang telah berkontribusi dalam meningkatkan pengetahuan kita tentang sistem iklim. Kandungan informasi dari berbagai sensor satelit tersebut telah meningkat secara eksponensial dalam beberapa dekade terakhir. Produk pengindraan jauh sering kali bersifat interdisipliner sehingga menawarkan potensi solusi untuk berbagai disiplin ilmu. Produk-produk pengindraan jauh digunakan untuk pemantauan iklim, evaluasi dan peningkatan model numerik yang mendasarinya, serta studi proses-proses fisis yang relevan. Data-data polusi dari hasil pengindraan jauh, dapat dikombinasikan dengan data awan dan hujan sehingga peneliti dapat menganalisis proses mikrofisika awan yang dipengaruhi oleh polusi udara, seperti aerosol. Selain itu, sistem pengindraan jauh yang memiliki kapabilitas pengukuran di beberapa level ketinggian, dapat membantu pemahaman pengaruh kondisi permukaan pada dinamika atmosfer di atasnya. Dengan demikian, perkembangan data pengindraan jauh dapat memberikan kontribusi positif dalam parameterisasi dalam pemodelan iklim yang diharapkan dapat meningkatkan akurasi dan resolusi model-model iklim.

Kebutuhan informasi terkait perubahan iklim terbagi dalam dua kategori utama. Pertama, informasi untuk lebih memahami penyebab perubahan iklim, khususnya siklus karbon global, termasuk sumber emisi karbon dan simpanan karbon. Misalnya, hilangnya karbon akibat deforestasi dan emisi dari pembakaran biomassa. Kedua, adanya kebutuhan untuk memantau dampak perubahan iklim. Misalnya, United Nations Framework Convention on Climate Change menyoroti kebutuhan informasi untuk kriosfer, termasuk tutupan salju, kecepatan aliran gletser dan lapisan es, dan distribusi es laut. Kebutuhan informasi penting terkait perubahan iklim telah mengarah pada pengembangan *essential climate variables* (ECVs), yang sebagian besar memerlukan data satelit untuk sistem pemantauan. Namun, terkadang terjadi perbedaan kebutuhan dan ketersediaan data, terutama yang menyangkut resolusi dan akurasi data. Beberapa lembaga di dunia terus melakukan perbaikan-perbaikan dalam sistem akuisisi data dan pengolahannya.

Oleh karena sistem iklim menyangkut banyak komponen (atmosfer, hidrosfer, kriosfer, litosfer, dan biosfer), data iklim tentunya bukan satu-satunya orientasi dalam pengembangan teknologi pengindraan jauh. Data dan sistem pengamatan biosfer, litosfer, dan komponen lainnya turut mengalami perkembangan. Saat ini, telah banyak data spasial berbasis pengindraan jauh dapat dapat dimanfaatkan untuk membantu pemantauan sistem hidrologi dan pengelolaan air pada tingkat lanskap. Contoh data spasial tingkat lanskap yang banyak digunakan sampai saat ini adalah data satelit Landsat ataupun Sentinel.

Landsat ataupun Sentinel ini memiliki sensor-sensor yang dirancang untuk memperoleh data dengan panjang gelombang yang berbeda dalam spektrum elektromagnetik (Lindgren, 1985). Multispectral Scanner (MSS) yang ada pada Landsat 1, 2, 3, 4, dan 5 mengumpulkan data dalam empat *band*; sensor Thematic Mapper (TM) pada Landsat 4 dan Landsat 5 memiliki *band* yang ditemukan pada satelit sebelumnya dan ditambah *band* termal dan gelombang inframerah pendek. Kemudian, *band* pankromatik ditambahkan ke sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) Landsat 7. Dalam perkembangan selanjutnya, Landsat 8 dirancang untuk memperoleh data dalam total 11 *band* dari dua sensor terpisah: Operational Land Imager (OLI) dan Thermal Thermal Sensor (TIRS), dan Landsat 9 memiliki sensor dan *band* yang sama dengan Landsat 8 dengan perbedaan pada resolusi yang lebih baik. Landsat generasi berikutnya, yang direncanakan diluncurkan pada tahun 2030-an, merupakan konstelasi tiga satelit. Setiap satelit akan membawa sensor untuk memperoleh data dalam total 26 pita spektral.

Salah satu contoh aplikasi Landsat dan Sentinel adalah pendugaan ketersediaan air berbasis data spasial dengan menggunakan pendekatan Normalized Difference Drought Index (NDDI). NDDI dihitung dengan mengombinasikan antara Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) dan Normalized Difference Drought Index (NDWI) (Renza et al., 2010). Tahapan identifikasi NDWI dapat dilihat pada Gambar 7.4.



Gambar 7.4 Permodelan NDDI menggunakan Landsat 8

Permodelan ini dapat dibuat menggunakan GEE melalui laman <https://earthengine.google.com/> yang merupakan aplikasi sumber terbuka (*open source*) untuk mengolah dan mendapatkan data spasial secara gratis, ataupun dengan QGis dan ArcGis. Keandalan data-data spasial memungkinkan untuk dilakukan berbagai analisis yang dapat membantu memperoleh pemahaman yang lebih baik mengenai sistem iklim. Sebuah contoh kasus penelitian di Bojonegoro, Jawa Timur menerangkan hubungan yang kuat ($r = 0.74$) dengan deskripsi apabila makin rapat tanaman (NDVI), nilai indeks kekeringan (NDDI) makin rendah. Begitu juga hubungan antara NDWI dan NDDI makin luas suatu permukaan air maka nilai NDDI makin rendah ($r = 0.80$) (Artikanur et al., 2022). Hasil permodelan NDDI nantinya dapat dikelaskan berdasarkan tingkat ketersediaan air. Penelitian yang dilakukan oleh Rismayatika et al. (2020) mengelaskan tingkat kekeringan menjadi tiga kelas *normal*, *rather dry*, and *dry*. Pengelasan tingkat kekeringan

juga dapat dibagi ke dalam lima kelas berdasarkan nilai NDDI, yaitu *very low, low, moderate, high*, dan *very high* (Artikanur et al., 2022).

Permodelan dengan NDDI lainnya mengambil lokasi penelitian di Eromoko, Wonogiri, Jawa Tengah dengan wilayah berupa bahan induk batu kapur. Wilayah ini memiliki tingkat penyerapan air yang rendah dan tingkat curah hujan 1800 mm/tahun yang termasuk katagori rendah. Dengan menggunakan data spasial yang diambil dari perekaman landsat delapan tahun 2021–2022, penelitian tersebut memodifikasi permodelan dengan menambah data aktual kadar lengas tanah pada kapasitas lapang (pF 2.5) dan kadar lengas tanah titik layu permanen (pF 4.2) yang diambil pada berbagai penggunaan lahan sebagai *ground check* atau validasi keadaan aktual wilayah Eromoko. Hasilnya menunjukkan bahwa tingkat akurasi penggunaan model NDDI dengan kadar lengas tanah aktual >75% (Mujiyo et al., 2023).

Permodelan data spasial dengan NDDI merupakan contoh penerapan teknologi yang murah dan cepat untuk melakukan pendugaan kekeringan (defisit air) dan kelebihan air (surplus). Selain itu NDDI dapat digunakan untuk mengidentifikasi kekeringan pada lahan pertanian dengan wilayah yang luas dan sulit dijangkau. Pemetaan wilayah pertanian yang kering menjadi sarana untuk membantu perencanaan waktu tanam yang sesuai dengan keadaan curah hujan dan ketersediaan air. Selain itu, pemetaan wilayah kering lahan pertanian memudahkan untuk menyesuaikan jenis tanaman yang akan ditanam sesuai dengan ketersediaan air. Manfaat bagi pemangku kepentingan pemetaan data spasial rawan kekeringan, khususnya pada lahan pertanian menjadi informasi untuk membantu dalam pengambilan keputusan dengan cepat berkaitan dengan pembuatan kebijakan.

C. Aplikasi Teknologi Digital untuk Prediksi Iklim

Model iklim dikembangkan dengan metode kuantitatif untuk menyimulasikan interaksi dalam sistem iklim. Ini merupakan salah satu alat terpenting untuk memprediksi dan menilai proyeksi iklim pada masa depan atau untuk mempelajari iklim pada masa lalu. Secara umum, dua jenis model yang umum digunakan adalah model dinamis

dan model statistik. Dasar dari model dinamik adalah sekumpulan persamaan diferensial terdiskritisasi yang diintegrasikan ke depan dari keadaan sekarang, yang dianggap sebagai kondisi awal. Contoh paling menonjol dari penggunaan model dinamis tidak diragukan lagi adalah model sirkulasi umum atau *general circulation model* (selanjutnya disingkat GCM). GCM menggunakan model matematis sirkulasi atmosfer planet dan lautan. Dengan demikian, di dalam perhitungannya menggunakan persamaan Navier-Stokes yang diaplikasikan pada bola yang berputar (menggambarkan gerakan fluida kental) dan prinsip termodinamika untuk sumber energi dan penyerapnya.

Model kedua yang digunakan dalam ilmu iklim adalah model statistik. Dalam desainnya, model ini sangat berbeda dengan model dinamik dalam arti bahwa model tersebut tidak didasarkan pada mekanisme fisik yang mendasari dinamika sistem yang dimodelkan, melainkan berasal dari analisis pola cuaca masa lalu. Mungkin konsep yang paling banyak digunakan adalah model stokastik terbalik, di mana model dirancang, kemudian diestimasi menggunakan data masa lalu dan, terakhir, diintegrasikan secara stokastik ke depan untuk mendapatkan prediksi.

Kerugian dari model jenis ini adalah pemilihan variabel yang menangkap sistem yang ingin dimodelkan. Masalah lain yang mungkin terjadi adalah nonstasioneritas sistem yang dimodelkan—karena model statistik tidak melibatkan mekanisme fisik yang mendasarinya, hanya interaksi antar subsistem (mengabaikan variabel tersembunyi), model yang diestimasi pada beberapa subset data masa lalu mungkin tidak tepat dalam menangkap semua kemungkinan keadaan sistem. Dengan kata lain, periode pelatihan data masa lalu yang digunakan untuk memperkirakan model statistik mungkin tidak mencakup seluruh ruang fase sistem yang dimodelkan. Pada umumnya, motivasi untuk membangun model statistik untuk fenomena tertentu, selain untuk meramalkannya, adalah untuk mengurangi kompleksitas permasalahan.

Beberapa macam metode peramalan untuk meramalkan curah hujan, di antaranya *fuzzy time series*, *hierarchical neural model*, *jaringan*

gan syaraf tiruan (*artificial neural network*). Namun, metode-metode tersebut tidak mempertimbangkan ketergantungan jangka panjang dan efek musiman. Sifat ketergantungan jangka panjang dapat diteksi apabila di antara pengamatan dengan periode yang terpisah jauh masih memiliki korelasi yang tinggi sehingga mempunyai *autocorrelation function* (ACF) yang turun perlahan secara hiperbolik.

Autoregressive integrated moving average (ARIMA) merupakan salah satu metode peramalan dengan mempertimbangkan ketergantungan jangka panjang. Model ARIMA diperkenalkan oleh George EP Box dan Gwilym M Jenkins (1976). Model ini bersifat univariat. Sementara itu, SARIMA (Seasonal ARIMA) merupakan model ARIMA dengan menggabungkan efek musiman. Sebuah kasus penggunaan SARIMA untuk memprediksi iklim di Balikpapan menunjukkan bahwa Metode ARIMA dan SARIMA cukup mampu meramalkan data curah hujan di Kota Balikpapan untuk bulan-bulan di awal tahun, tetapi peramalan masih belum tepat pada beberapa bulan tertentu terutama bulan Agustus dan September. Namun, setidaknya peramalan ini dapat digunakan oleh para petani untuk pendekatan dalam menentukan musim tanam dan menentukan strategi yang tepat untuk menanam pada kondisi curah hujan yang relatif rendah. Di daerah Kota Balikpapan curah hujan cenderung masuk kategori berawan sampai ringan. Oleh karena itu, perlu dilakukan strategi penanaman yang tepat dan komoditas yang tahan akan sedikit air terutama pada bulan September dan Oktober. Pergiliran tanaman dari komoditas musim hujan yang biasanya ditanami padi, dengan komoditas musim kemarau bermanfaat untuk memotong rantai serangan hama dan penyakit serta memperbaiki kondisi tanah. Komoditas tanaman pangan yang dapat ditanam pada musim kering, antara lain, jagung, terong, kacang panjang. Namun, setiap tahunnya curah hujan berfluktuatif sehingga dibutuhkan data, metode, dan teknologi untuk meramalkan curah hujan pada periode berikutnya.

Penggunaan data dan teknologi ini juga berguna bagi pemerintah dalam menentukan kebijakan dan bantuan bagi petani terutama untuk menciptakan ketahanan pangan di Indonesia. Di antaranya pada

bulan-bulan yang diramalkan dengan curah hujan rendah, pemerintah dapat menerapkan strategi diversifikasi pangan lokal dengan meningkatkan produksi jagung, sorgum, sagu, dan singkong melalui perluasan lahan dan pembukaan area baru dalam rangka peningkatan produksi. Pemerintah juga bisa memfokuskan Kota Balikpapan pada bulan-bulan dengan curah hujan rendah terutama bulan September dan Oktober disediakan pupuk bersubsidi dengan membatasi penyaluran pupuk bersubsidi untuk komoditas-komoditas yang tahan akan kondisi sedikit air dengan jenis pupuk yang disalurkan adalah pupuk urea dan NPK.

Metode ARIMA maupun SARIMA merupakan metode berbasis univariat atau menggunakan satu peubah. Pada ke depannya peramalan data curah hujan dapat dilakukan dengan menggunakan banyak peubah bebas (multivariat) sehingga data peramalan lebih akurat. Beberapa peubah bebas yang dapat digunakan untuk peramalan curah hujan, seperti kelembapan udara, suhu, lama peninjiran matahari, dan tekanan udara. Beberapa metode peramalan curah hujan berbasis multivariat di antaranya adalah metode fungsi transfer, *vector autoregressive* (VAR), *vector error correction model* (VECM), *struktural VAR* (SVAR), dan *autoregressive distributed lag* (ARDL). Metode-metode tersebut diharapkan dapat menghasilkan penduga yang lebih baik dibandingkan pemodelan data yang hanya menggunakan satu peubah.

D. Aplikasi Teknologi Digital untuk Manajemen Pertanian

Tidak hanya untuk sistem prediksi iklim, digitalisasi juga memiliki peranan penting dalam manajemen pertanian dan pengembangan aksi perubahan iklim. Penerapan teknologi digital untuk menentukan aksi iklim dan ketahanan pangan dapat mencakup hal-hal sebagai berikut.

- 1) Analisis ketersediaan air: hal ini dapat mengoptimalkan distribusi dan mengurangi kerugian, yang khususnya relevan dalam konteks kelangkaan air akibat perubahan iklim.
- 2) Analisis dan manajemen infrastruktur, seperti gas alam, antara lain untuk mengurangi kebocoran dan emisi gas rumah kaca,

- mengoptimalkan distribusi energi, termasuk sumber terbarukan, atau penerangan umum.
- 3) Pengembangan sistem pertanian cerdas dan presisi, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, seperti air dan bahan kimia, penentuan komoditas yang sesuai dengan kondisi iklim dan lingkungan, serta manajemen biaya.
 - 4) Manajemen ruang kerja, yang berkaitan dengan pola-pola masyarakat beraktivitas: mengurangi perjalanan sehari-hari, konsumsi energi, dan emisi CO₂ terkait. Selain itu, digitalisasi dokumen dan pengurangan penggunaan kertas berdampak positif terhadap lingkungan.

Aplikasi SPKL merupakan sebuah aplikasi yang dikembangkan oleh Balai Penelitian Tanah, Kementerian Pertanian. Aplikasi ini berfungsi untuk menilai kesesuaian komoditas yang akan ditanam dengan kondisi lahan dan iklim. Data yang digunakan untuk menentukan komoditas/jenis tanaman yang sesuai, di antaranya adalah temperatur, ketersediaan air, kondisi perakaran, retensi hara, ketersediaan hara, salinitas, alkalinitas, toksisitas, bahaya sulfidik, bahaya erosi, bahaya banjir, penyiapan lahan, dan klasifikasi tanah. Secara garis besar, kesesuaian lahan dihubungkan dengan dua kondisi, yaitu kondisi tanah dan kondisi iklim. Penilaian kesesuaian lahan ini dibagi ke dalam S-1 (sangat sesuai), S-2 (cukup sesuai), S-3 (sesuai marginal), dan N (tidak sesuai). Pembagian pengelasan ini berhubungan dengan mampu tidaknya tanah menjalankan fungsi produksi. Hasil penilaian kesesuaian dapat langsung dihubungkan dengan data spasial (GIS) untuk selanjutnya disajikan menjadi berbagai peta kesesuaian lahan komoditas tertentu, zona agro ekologi, maupun peta kemampuan lahan (Bachri et al., 2015).

Aplikasi SPKL dapat diterapkan di berbagai wilayah. Sebagai contohnya, penulis menyajikan kasus penggunaan SPKL untuk Provinsi NTT. Provinsi NTT merupakan salah satu provinsi di kawasan timur Indonesia, wilayah Nusa Tenggara mempunyai iklim kering dan curah hujan rendah dengan curah hujan kurang dari 2.000 mm/tahun. Dari 13,3 juta hektare lahan kering di Indonesia, sekitar 3 juta hektare

berada di Nusa Tengara Timur (NTT), di mana sekitar 72% di antaranya merupakan pegunungan dengan wilayah dangkal dan berbatu.

Bahan induk tanah di Provinsi NTT yang mempunyai sebaran terluas ialah sedimen dan volkan dengan ordo tanah dominan Inceptisols (Haplustepts) yang berasosiasi dengan Alfisols (Haplustalfs) dan Entisols (Ustortherts) sekitar 2,1 juta ha. Dilihat dari sebaran bahan induk tanah di wilayah NTT, kesuburan tanah tergolong sangat variatif, yaitu antara kesuburan sedang hingga kesuburan tinggi. Hal ini dapat dikatakan bahwa kesuburan bukanlah kendala utama dalam kesesuaian lahan di Provinsi NTT.

Jagung merupakan komoditas penting di NTT karena merupakan bahan makanan utama sebagian besar masyarakat NTT, selain beras. Hal ini terlihat dari luas panen jagung di seluruh kabupaten NTT pada tahun 2017 yang mencapai 313.150 hektare, lebih besar dibandingkan luas panen padi yang mencapai 307.988 hektare. Meskipun jagung banyak ditanam di wilayah NTT, tetapi produktivitas jagung di wilayah NTT masih rendah. Rata-rata hasil jagung di NTT pada tahun 2017 sebesar 2,76 ton/ha, lebih rendah dibandingkan hasil jagung nasional sebesar 5,23 ton/ha. Data kondisi tanah di NTT dari Mulyani et al. (2014) yang telah ditabulasi disajikan dalam Tabel 7.1 dan Tabel 7.2.

Tabel 7.1 Kondisi Tanah di NTT

SPL	Tekstur (pipet)			pH _{H₂O}	Bahan organik		HCl 25%		Olsen
	Pasir	Debu	Liat		C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅
%%%		mg/100	ppm			
Sumba Barat Daya, NTT (1)	11	49	40	6,2	2,93	0,27	56	16	184
Sumba Barat, NTT (2)	13	35	52	5,2	2,75	0,24	92	13	21
Sumba Timur, NTT (3)	17	21	62	6,0	1,07	0,09	22	14	15
Kupang, NTT (4)	22	35	43	6,0	1,61	0,15	174	65	35
Malak, NTT (5)	37	27	36	7,8	0,95	0,09	60	164	13
Timor Tengah Utara, NTT (6)	31	31	38	7,7	0,77	0,07	114	268	14

Sumber: Mulyani et al. (2014)

Tabel 7.2 Kondisi Tanah di NTT

SPL	Nilai tukar kation (NH ₄ -Acetat 1N, pH 7)						
	Ca	Mg	K	Na	Jumlah	KTK	KB
cmol/kg.....						%
Sumba Barat Daya, NTT (1)	40,62	2,56	0,24	0,27	43,69	40,08	>100
Sumba Barat, NTT (2)	13,36	1,57	0,17	0,15	15,25	20,91	73
Sumba Timur, NTT (3)	43,98	2,81	0,30	0,14	47,23	40,80	>100
Kupang, NTT (4)	16,53	2,01	0,79	0,10	19,43	14,76	>100
Malak, NTT (5)	28,29	0,85	0,85	0,15	30,14	14,20	>100
Timor Tengah Utara, NTT (6)	25,63	2,33	3,03	0,34	31,33	22,68	>100

Sumber: Mulyani et al. (2014)

Berdasarkan kedua data tabel (Tabel 7.1 dan Tabel 7.2), didapatkan hasil kesesuaian lahan untuk lahan tanaman jagung di wilayah NTT seperti terlihat dalam Tabel 7.3.

Tabel 7.3 Hasil Evaluasi Lahan di NTT

No_Tanah	Expr1	Sub_Zona	Komoditas	Sub_Kelas
1 /Dfs	fs	Jagung (Zea mays)	S1 - nr1/nr2/nr3/nr4	
2 /Dfs	fs	Jagung (Zea mays)	S3 - nr3	
3 /Dfs	fs	Jagung (Zea mays)	S1 - nr1/nr2/nr3/nr4	
4 /Dfs	fs	Jagung (Zea mays)	S2 - nr1	
5 /Dfs	fs	Jagung (Zea mays)	S2 - nr1/nr3	
6 /Dfs	fs	Jagung (Zea mays)	S1 - nr1/nr2/nr3/nr4	

Sumber: Yuliyani et al. (2023)

Dari Tabel 7.3, terlihat bahwa terdapat tiga lokasi yang sangat sesuai untuk pengembangan komoditas jagung, yaitu Sumba Barat Daya, Sumba Timur, dan Timor Tengah Utara. Cukup sesuai untuk wilayah Kupang dan Malak serta sesuai marginal di Sumba Barat dengan faktor pembatas pH yang terlampaui rendah dan dapat diberikan input pengapuran untuk menetralkannya.

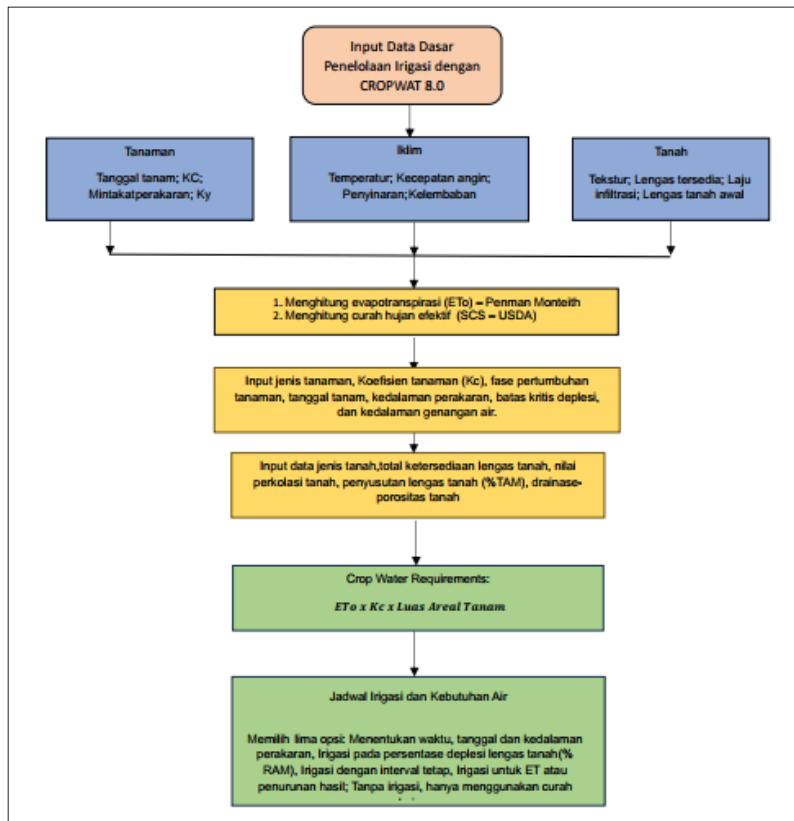
Namun, kesesuaian lahan pada era perubahan iklim adalah sesuatu tantangan karena kondisi lahan terutama aspek cuaca yang berubah dengan cepat sehingga perlu upaya mitigasi yang fleksibel. Evaluasi kesesuaian lahan seperti yang dikenal merupakan sebuah upaya dalam bidang pertanian yang berfungsi untuk mencocokkan

kondisi lahan terhadap tanaman yang akan ditanam. Pendekatan yang saat ini digunakan dan merupakan program kesesuaian lahan yang paling mudah diaplikasikan adalah dengan menginput data lahan pada aplikasi SPKL. Jagung adalah tanaman potensial dan sesuai dikembangkan di wilayah NTT. Dengan data kondisi iklim dan tanah yang lebih lengkap maka kesesuaian lahan di NTT akan lebih tajam dalam rangka menghitung luasan lahan existing yang dapat dipergunakan untuk pengembangan jagung di NTT.

Pemilihan komoditas yang tepat, bukanlah satu-satunya langkah yang harus diambil. Dalam hal ini, ketahanan pangan perlu didukung oleh manajemen pemeliharaan tanaman pangan, termasuk manajemen suplai air. Pemberian kebutuhan air irigasi yang efisien dapat diusahakan dengan cara yang murah dan mudah dengan menghitung neraca air. Food and Agriculture Organization (FAO) telah mengembangkan penggunaan CROPWAT 8.0 untuk pengguna Windows. Aplikasi ini telah dikembangkan sejak tahun 1990 yang berfungsi sebagai perangkat lunak (*software*) permodelan untuk menduga kebutuhan air tanaman dan penjadwalan pemberian air irigasi (Smith, 1992). CROPWAT 8.0 dikembangkan untuk menduga kebutuhan air berdasarkan metode Penman-Monteith. Variabel input yang digunakan pada *software* ini adalah data jenis tanah, kadar lengas tanah, iklim, dan tanaman (Allen et al., 1998). Data iklim yang dibutuhkan berupa suhu minimum dan maksimum, kelembapan, dan kecepatan angin. *Software* CROPWAT 8.0 dapat menyimpan data iklim, tanah, dan tanaman secara *default* dalam skala besar. Namun, pengguna juga dapat menggunakan data iklim yang lebih detail sesuai dengan spesifikasi lokasi tertentu. Data iklim tersebut dapat diperoleh melalui aplikasi CLIMWATE 2.0 *for* CROPWAT (Gabr, 2022b), laman <https://dataonline.bmkg.go.id>, dan melalui laman data spasial yang menyediakan data iklim dari seluruh dunia, yakni <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. Penggunaan CROPWAT 8.0 ini telah menyesuaikan dengan referensi perhitungan ETo (Evapotranspirasi potensial/ETP); penggunaan nilai koefisien tanaman (Kc) sesuai dengan jenis dan fase pertumbuhan tanaman, faktor respons tanaman

terhadap cekaman air (Ky), perhitungan hujan efektif (Pe), dan reduksi produksi (Doorenbos et al., 1980; Allen et al., 1998).

CROPWAT 8.0 sebagai *software* permodelan yang digunakan untuk menduga kebutuhan air dimilai akurat menyusun perencanaan jadwal irigasi untuk berbagai jenis tanaman. Penentuan kebutuhan air dengan CROPWAT 8.0 dilakukan dengan menghitung nilai ETo dan nilai curah hujan efektif (*effective rainfall*), menyesuaikan dengan metode FAO ataupun USDA (Roja et al., 2020). Tahap permodelan dengan CROPWAT 8.0 seperti pada Gambar 7.5.



Gambar 7.5 Tahapan untuk Menjalankan Permodelan dengan CROPWAT 8.0

Contoh hasil permodelan dengan CROPWAT 8.0 mengambil wilayah di Balikpapan, Kalimantan Timur. Data iklim yang diperoleh dari CLIMWAT 2.0, padi dipilih sebagai komoditas pangan yang akan dibudidayakan. Periode tanam direncanakan pada bulan Agustus dan panen pada bulan Desember. Setelah menginput data iklim, tanah, jenis tanaman, dan menghitung nilai ETo serta curah hujan efektif (Pe), didapatkan jadwal irigasi dan jumlah total pengairan (*total gross irrigation*) dalam satu musim tanam, selain itu didapatkan juga informasi yang memuat jadwal irigasi yang harus diberikan. Permodelan ini dapat digunakan untuk memprediksi kebutuhan air tanaman harian, dekade, dan bulanan pada berbagai tahap pertumbuhan tanaman (Roja et al., 2020). Tampilan tabel rekomendasi pemberian air pada CROPWAT 8.0 dapat dilihat pada Gambar 7.6.

Rice irrigation schedule

ETo station: BALIKPAPAN-SEPINGE Crop: Rice
Rain station: BALIKPAPAN-SEPINGE Soil: BLACK CLAY SOIL
Planting date: 14/08 Yield red.: 0.0 %
Harvest date: 11/12

Scheduling criteria:

	Pre pudding	Puddling	Growth stages
Timing	Irrigate at fixed % depletion of FC	Irrigate at fixed mm waterdepth	Irrigate at fixed waterdepth
Application	Refill to fixed % saturation	Refill to fixed water depth	Refill to fixed waterdepth

Table format:

Irrigation schedule Daily soil moisture balance Field efficiency 70 % Soaking depth 0.5 m

Date	Day	Stage	Rain	Ks	Eta	Puddl	Percol.	Depl.SM	Net Gft	Loss	Depl.SAT
			mm	fract.	%	state	mm	mm	mm	mm	mm
25 Jul	-19	PrePu	0.0	0.90	90	Prep	0.0	41	91.3	0.0	40.0
9 Aug	-4	Puddl	0.0	1.00	100	Prep	0.7	1	90.0	0.0	40.0
12 Aug	-1	Puddl	0.0	1.00	100	OK	7.7	0	52.0	0.0	2.0
11 Oct	59	Mid	0.0	1.00	100	OK	3.1	0	100.7	0.0	0.7
11 Dec	End	End	0.0	1.00	100	OK	36.2	0			

Totals

Total gross irrigation	477.2	mm	Total rainfall	894.0	mm
Total net irrigation	334.0	mm	Effective rainfall	881.6	mm
Total irrigation losses	0.0	mm	Total rain loss	2.4	mm
Total percolation losses	564.6	mm			
Actual water use by crop	494.8	mm	Moist deficit at harvest	6.5	mm
Potential water use by crop	494.8	mm	Actual irrigation requirement	-386.8	mm
Efficiency irrigation schedule	100.0	%	Efficiency rain	99.7	%
Deficiency irrigation schedule	0.0	%			

Sumber: Cropwat (2023)

Gambar 7.6 Tampilan Jadwal Irigasi pada Aplikasi CROPWAT 8.0

Contoh kasus lainnya adalah riset yang dilaksanakan di wilayah kering Elkantara, di utara Sinai, Mesir. Kasus tersebut menggunakan permodelan dengan CROPWAT 8.0 yang mengambil basis data iklim dari CLIMWAT 2.0 (dengan rentang tahun 1975–2014). Riset tersebut membandingkan penggunaan irigasi permukaan (*surface irrigation*) dengan tingkat efisiensi 40% dan irigasi curah (*sprinkle irrigation*) dengan tingkat efisiensi 60%. Permodelan ini dilakukan pada jenis tanah liat dan berpasir. Permodelan CROPWAT 8.0 ini dipadukan dengan pola jenis tanaman yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan tekstur tanah dan jenis tanaman berpengaruh terhadap kebutuhan air tanaman. Jenis tanah berpasir meningkatkan kebutuhan air irigasi hingga 25%. Pola pemilihan tanaman antara semanggi dan kapas meningkatkan kebutuhan air 22,1%. Sementara itu, penanaman kacang hijau dan bit dapat menghemat penggunaan air sampai dengan 23%. Selain itu, penggunaan jenis irigasi *sprinkle* dengan tingkat efisiensi 65% dan irigasi tetes 80% dapat menghemat penggunaan air hingga 36,7% (Gabr, 2022b).

Permodelan dengan CROPWAT 8.0 pada beberapa penelitian dinilai efektif dan efisien dalam mendukung sistem manajeman kebutuhan air, waktu tanam dan untuk mensimulasi pola jenis tanaman yang sesuai dengan keadaan wilayah setempat. Pemodelan seperti yang ada dalam sistem CROPWAT 8.0, penting dilakukan untuk menduga ketersediaan air pada tahun-tahun dengan curah hujan normal ataupun defisit untuk berbagai skala waktu (Gabr, 2022b, 2022a; Roja et al., 2020) dan memberi jaminan yang lebih baik dalam hal tingkat produksi pertanian.

E. Penutup

Iklim ekstrem merupakan ancaman bagi ketahanan pangan dan stabilitas negara. Oleh karena itu, dibutuhkan pengambilan keputusan yang cepat untuk membentuk kebijakan startegis. Pengambilan keputusan yang cepat dan murah dapat dilakukan dengan memaksimalkan kemajuan teknologi digital, yang mencakup penggunaan *dataset* iklim, permodelan data spasial, dan penggunaan aplikasi, seperti SPKL,

permodelan ARIMA, dan CROPWAT 8.0. Permodelan tentunya digunakan sebagai estimasi atau pendugaan kondisi lingkungan dan sumber daya, termasuk ketersediaan air. Namun, keakuratannya perlu dikalibrasi dengan menggunakan data aktual di lapangan. Kendati demikian, penggunaan data spasial hasil pemodelan dan pengindraan jauh dapat dipertimbangkan untuk cakupan area yang luas yang menjangkau daerah atau wilayah yang tidak memungkinkan penggunaan data pengukuran *in situ*.

Pemanfaatan teknologi digital dalam penggunaan permodelan spasial dan aplikasi, seperti SPKL serta CROPWAT 8.0 menjadi salah satu *tools* untuk memitigasi ancaman kekeringan. Mitigasi dapat dilakukan dengan mengendalikan faktor kekeringan lahan. Upaya adaptasi terhadap kekeringan yang dilakukan untuk menjaga kelembapan tanah. Upaya adaptasi dapat meliputi perencanaan irigasi berdasarkan model pendugaan/estimasi kekeringan lahan, penerapan vegetasi sebagai mulsa dan mulsa organik dari sisa panen tanaman, pemupukan organik, dan pemenuhan kebutuhan air pada masa tanam. Hal ini dapat dinTEGRASIKAN dengan upaya-upaya lainnya, seperti penambahan lokasi penampungan air hujan berupa pembuatan bendungan waduk, kolam, sumur resapan di berbagai lokasi dan embung, peningkatan tutupan vegetasi, pelestarian kawasan karst. Dalam hal ini, diperlukan kerja sama yang kuat antara pemerintah, masyarakat, dan pemangku kepentingan terkait langkah-langkah adaptasi dan mitigasi dampak perubahan iklim.

Referensi

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements* (Paper-56). FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm>
- Artikanur, S. D., Widiatmaka, Setiawan, Y., & Marimin. (2022). Normalized Difference Drought Index (NDDI) computation for mapping drought severity in Bojonegoro Regency, East Java, Indonesia. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 1109, Artikel 012027). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1109/1/012027>.

- Bachri, S., & Sulaeman, Y. (2015). SPKL: Program komputer untuk evaluasi kesesuaian lahan. Dalam *Prosiding seminar nasional informatika pertanian 2015* (160–172). Fakultas Teknologi Industri Pertanian Universitas Padjajaran.
- Bloomberg, J. (2018). Digitization, digitalization, and digital transformation: confuse them at your peril. *Forbes*.
- IPCC. (2022). *Fact Sheets*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/about/factsheets>.
- Lindgren, D. T. (1985). *Land use planning and remote sensing*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-2035-9>
- Diyasti, F., & Amalia, A. W. (2021). Peran perubahan iklim terhadap kemunculan OPT baru. *AGROSCRIPT: Journal of Applied Agricultural Sciences*, 3(1), 57–69.
- Doorenbos, J., Kassam, A. H., Bentvelsen, C., & Uittenbogaard, G. (1980). *Yield Response to water-Paper 33*. In *Irrigation and Agricultural Development*. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Estiningtyas W, Ramadhani F, & Aldrian E. (2007). Analisis korelasi curah hujan dan suhu permukaan laut wilayah Indonesia, serta implikasinya untuk prakiraan curah hujan (studi kasus Kabupaten Cilacap). *Jurnal Agromet Indonesia*, 21(2), 46–60.
- Gabr, M. Els. (2022a). Management of irrigation requirements using FAO-CROPWAT 8.0 model: A case study of Egypt. *Modeling Earth System and Environment*, 8, 3127–3142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40808-021-01268-4>
- Gabr, M. Els. (2022b). Modelling net irrigation water requirements using FAO-CROPWAT 8.0 and CLIMWAT 2.0: A case study of Tina Plain and East South ElKantara regions, North Sinai, Egypt. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 68(10), 1322–1337. <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1892650>
- Hermans, K., & McLeman, R. (2021). Climate change, drought, land degradation and migration: Exploring the linkages. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 50, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.04.013>
- Hosang M. L. A. (2017, 9 Mei). *Kajian potensi hama tanaman palma dan strategi pengendalian secara hayati*. Simposium Kurma Tropika I, Balai Penelitian Tanaman Palma Bogor, Indonesia. .

- Roja, M., Deepthi, Ch., & Reddy, M. D. (2020). Estimation of crop water requirement of sunflower crop using FAO CROPWAT 8.0 model for North Coastal Andhra Pradesh. *Agro Economist - An International Journal*, 7(2), 13–18.
- Makridakis S, Wheelwright S. C., & Hyndman R. J. (1998). *Forecasting: Methods and applications* (Edisi ke-3). John Wiley and Sons.
- Mujiyo, M., Nurdianti, R., Komariah, & Sutarno. (2023). Agricultural land dryness distribution using the Normalized Difference Drought Index (NDDI) algorithm on Landsat 8 imagery in Eromoko, Indonesia. *Environment and Natural Resources Journal*, 21(2), 127–139. <https://doi.org/10.32526/ennrj/21/202200157>
- Mulyani, A., Priyono, A., & Agus, F. (2013). Semiarid soils of eastern Indonesia: Soil classification and land uses. Dalam S. A. Shahid et al. (Ed.), *Developments in soil classification, land use planning and policy implications: Innovative thinking of soil inventory for land use planning and management of land resources* (449–466).
- NASA. (2023). *NASA POWER | DAV*. Diakses 10 September, 2023, dari <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Renza, D., Martinez, E., Arquero, A., & Sanchez, J. (2010, Mei). Drought estimation maps by means of multiday Landsat fused images. Dalam *Proceedings of the 30th EARSeL Symposium* (775–782). https://www.earsel.org/symposia/2010-symposium-Paris/Proceedings/EARSeL-Symposium-2010_17-03.pdf
- Rismayatika, F., Saraswati, R., Shidiq, I. P. A., & Taqyyudin. (2020). Identification of dry areas on agricultural land using normalized difference drought index in Magetan Regency. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 540, Artikel 012029). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/540/1/012029>
- Rizky, M. (2023). *Petaka kekeringan hantam 27.000 ha pertanian RI efek El Niño*. CNBC Indonesia. <https://www.cnbcindonesia.com/news/20230809122706-4-461431/petaka-kekeringan-hantam-27000-ha-pertanian-ri-efek-El-Niño>
- Roja, M. (2020). Estimation of Crop Water Requirement of Maize Crop Using FAO CROPWAT 8.0 Model. *Indian Journal of Pure & Applied Biosciences*, 8(6), 222–228. <https://doi.org/10.18782/2582-2845.8148>

- Smith, M. (1992). CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. Dalam *FAO Irrigation and Drainage Paper 46* (46th ed., Issue 46). FAO.
- Tono, Andayani, D. W., Hidayat, A., Maheswari, L. D.; Ulfa, N. A. (2022). *Indeks ketahanan pangan tahun 2022*. Badan Pangan Nasional.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2012 tentang Pangan (2012). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/39100>
- Wang, W., Feng, Z., & Ma, M. (2022). Climate changes and hydrological processes. *Water*, 14(23), 3922. <https://doi.org/10.3390/w14233922>.
- Yuliyani, L., Salam, R., Bahar, R. R., Hartoyo, T., & Pramita, D. A. (2023). Analisis efisiensi usahatani padi berdasarkan musim di Indonesia. *Jurnal Agristan*, 5(1), 74–87.

Bab VIII

Kompleksitas Pemodelan Deret Waktu untuk Cuaca: Kasus Kelembapan Relatif dan Penyinaran Matahari

Januardi

A. Urgensi Pemodelan Iklim/Iklim sebagai Sistem yang Kompleks

Cuaca dan iklim mempunyai pengaruh besar terhadap kehidupan di Bumi. Mereka adalah bagian dari pengalaman sehari-hari manusia dan penting untuk kesehatan, produksi pangan, dan kesejahteraan. Banyak pihak yang menganggap bahwa perubahan iklim yang disebabkan oleh manusia sebagai suatu hal yang memprihatinkan. Laporan penilaian kedua yang dilakukan IPCC menyajikan bukti ilmiah bahwa aktivitas manusia mungkin telah memengaruhi iklim. Jika seseorang ingin memahami, mendekripsi, dan pada akhirnya memprediksi pengaruh manusia terhadap iklim, kita perlu mema-

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Januardi

Universitas Padjadjaran, *e-mail:* januardi@unpad.ac.id

© 2024 Editor & Penulis

Januardi. (2024). Kompleksitas pemodelan deret waktu untuk cuaca: Kasus kelembapan relatif dan penyinaran matahari. Dalam D. E. Nuryanto & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (225–261). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1244.c1392. E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

225

hami sistem yang menentukan iklim bumi dan proses-proses yang menyebabkan perubahan iklim.

Variasi dan perubahan iklim, yang disebabkan oleh faktor eksternal, mungkin dapat diprediksi terutama pada skala spasial yang lebih besar, yaitu benua dan global. Karena aktivitas manusia, seperti emisi gas rumah kaca atau perubahan penggunaan lahan, diyakini bahwa aspek skala besar dari perubahan iklim yang disebabkan oleh manusia juga dapat diprediksi. Namun, kemampuan untuk melakukan hal tersebut terbatas karena kita tidak dapat secara akurat memprediksi perubahan populasi, perubahan ekonomi, perkembangan teknologi, dan karakteristik relevan lainnya dari aktivitas manusia pada masa depan. Oleh karena itu, dalam praktiknya, kita harus bergantung pada skenario perilaku manusia yang disusun secara cermat dan menentukan proyeksi iklim berdasarkan skenario tersebut.

Banyak proses interaksi fisik, kimia, dan biologi yang terjadi di antara berbagai komponen sistem iklim dalam rentang skala ruang dan waktu yang luas sehingga menjadikan sistem tersebut menjadi sangat kompleks. Meskipun komponen-komponen sistem iklim sangat berbeda dalam komposisi, sifat fisik dan kimia, struktur dan perilakunya, semuanya saling terkait oleh fluks massa, panas, dan momentum (semua subsistem bersifat terbuka dan saling berhubungan). Banyak metode yang saat ini telah berkembang dan digunakan untuk memahami dan menganalisis iklim, seperti hierarki model sistem bumi satu dimensi yang sederhana hingga empat dimensi yang rumit atau memisahkan berbagai proses yang terlibat dalam iklim. Metode-metode tersebut terus berkembang mengingat adanya kebutuhan prediksi iklim dan cuaca untuk menunjang berbagai aktivitas ekonomi, terutama di sektor pertanian dan pangan.

Iklim memberikan pengaruh penting pada proses pertumbuhan dan pemanenan dari tanaman pangan. Tingginya suhu dan rendahnya kelembapan udara akan menyebabkan laju evaporasi yang berlebih pada air di tanah (Heino et al., 2023). Akibatnya, nutrisi yang ada pada air akan ikut teruapkan dan tidak dapat diserap oleh akar tanaman. Laju pertumbuhan tanaman akan terhambat dan panen yang diha-

silikan lebih sedikit. Perubahan iklim dewasa ini yang bersuhu tinggi dengan kelembapan yang rendah membuat tingginya probabilitas suatu daerah menuju kekeringan (Tabari & Willems, 2023). Juga tingginya pola ketidakpastian (*uncertainty*) dari perubahan iklim (Jeantet et al., 2023) membuat tantangan dalam proses penanaman dan pemanenan tanaman pangan menjadi lebih sulit. Oleh karena itu, pengembangan teknik, teknologi, dan model prediksi cuaca dan iklim sangat diperlukan untuk proses penjadwalan penanaman dan pemanenan tanaman pangan yang lebih optimal.

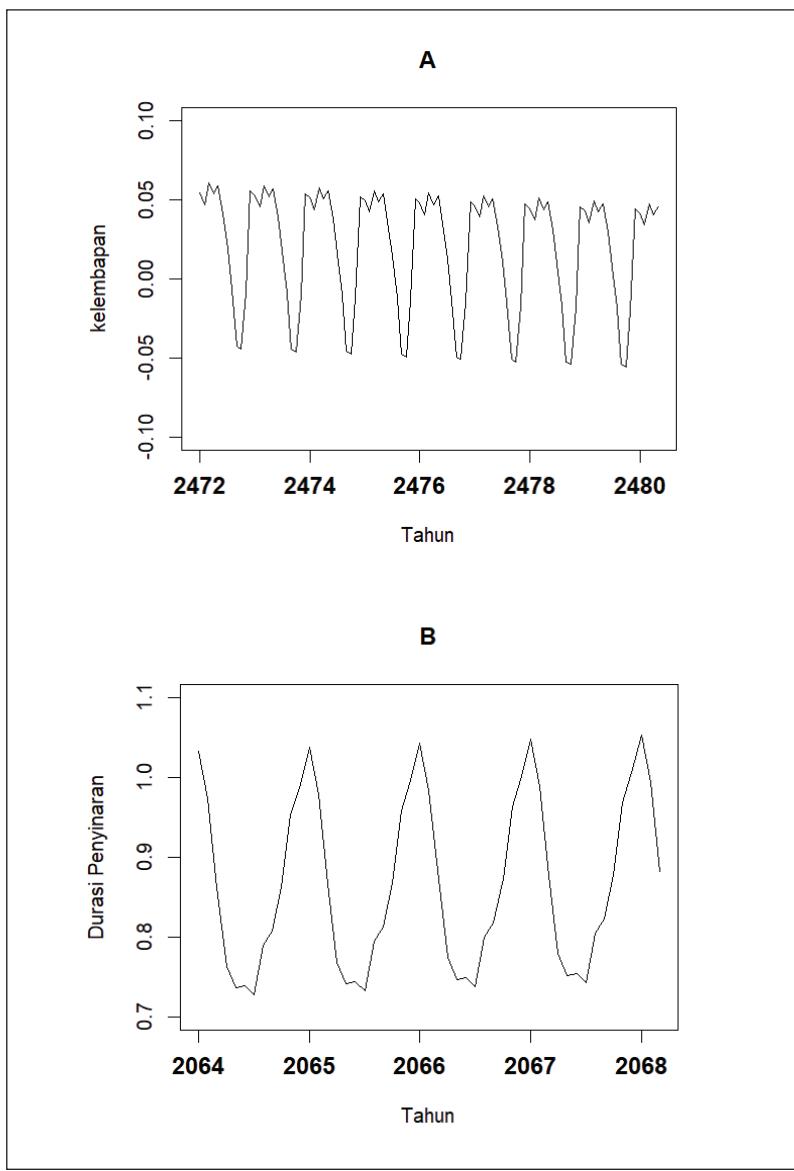
Prediksi iklim dan cuaca dilakukan dengan menggunakan teknik dinamis, atau menggunakan teknik statistik. Untuk prediksi iklim dan cuaca berbasis statistika, sering kali bersifat *autoregressive*, seperti *autoregressive integrated moving average* (McClymont et al., 2023), regresi linear (Sridhara et al., 2023), dan lainnya. Sebagai sebuah proses statistik, prediksi melibatkan banyak bilangan. Konsep bilangan pada matematika merupakan konsep dasar yang penting dalam pemodelan dan prediksi iklim. Dalam hal ini, beberapa parameter cuaca dan iklim memiliki karakteristik sendiri yang tidak sama dengan parameter lainnya. Mengabaikan karakteristik yang melekat pada masing-masing parameter sering kali berakibat pada hasil prediksi yang tidak logis. Sebagai perbandingan, parameter suhu sebuah benda, dapat berada di bawah 0°C , seperti es, atau di atas 400°C , seperti suhu lava yang mana hal tersebut sangat tergantung pada sifat benda. Inti matahari dapat mencapai suhu mencapai 15 juta derajat celsius.

Berbeda dengan konsep suhu, nilai parameter kelembapan relatif hanya berkisar antara 0%–100%. Ini terkait dengan pengertiannya sendiri sebagai sebuah hasil perbandingan antara jumlah uap air di dalam udara (kelembapan mutlak) dengan jumlah uap air maksimum yang dapat dikandung dalam udara tersebut. Demikian juga dengan nilai parameter durasi penyinaran. Karena keterbatasan rentang nilai tersebut, perlu kehati-hatian dalam proses pemodelan dan prediksinya. Dalam praktiknya, terkadang proses pemodelan dan prediksi iklim membutuhkan metode transformasi data untuk membantu menjaga nilai parameter sesuai dengan kaidahnya. Namun,

sesuai dengan sifat sistem iklim yang kompleks, penggunaan metode tersebut, tidak berarti memberi implikasi positif pada peningkatan akurasi dan resolusi hasil model atau prediksi. Dalam bab ini, penulis akan menunjukkan kompleksitas sistem prediksi di mana penggunaan metode transformasi hanya dapat memberi kontribusi untuk menjaga konsistensi nilai hasil prediksi sesuai dengan kaidah dan kriteria parameter iklim.

Dalam demonstrasi transformasi data ini, penulis menggunakan kasus kelembapan dan durasi penyinaran di Kota Bandung. Penyajian data dan analisis prediksinya ditunjukkan pada bagian permodelan (Subbab D) dengan menggunakan data dari tahun 2000 sampai 2022 untuk dapat menghasilkan model prediksi untuk beberapa tahun ke depan. Prediksi dilakukan menggunakan *time series linear model* (TSLM) untuk mencakup kondisi linieritas antarperiod dan fungsi *autoregressive* (Paoletta, 2018). Prediksi dilakukan sampai tahun 2480 untuk kelembapan dan durasi penyinaran sampai tahun 2068. Dasar pertimbangan dalam penentuan periode prediksi tersebut adalah pola kelembapan dan durasi penyinaran di Kota Bandung yang cenderung stagnan sehingga nilai yang tidak konsisten atau di luar kaidah, baru terlihat pada periode tersebut. Terdapat kemungkinan bahwa daerah lain yang memiliki tren lebih tajam maka ketidakkonsistenan mungkin akan terlihat dalam periode yang lebih pendek. Bab ini hanya menyajikan contoh kasus di mana muncul nilai-nilai hasil prediksi yang di luar kaidah dan bagaimana mengatasinya.

Pada Gambar 8.1 A, prediksi kelembapan menjadi di luar kaidah dengan memiliki nilai kurang dari 0. Prediksi durasi penyinaran juga akan memiliki nilai yang di luar kaidah dengan memiliki nilai yang melebihi 100% di Gambar 8.1 B. Meskipun prediksi yang dilakukan cukup jauh karena cuaca Kota Bandung tidak memiliki variansi ekstrem dan tren yang cenderung stagnan, prediksi hasil perhitungan menunjukkan adanya nilai kelembapan udara dan durasi penyinaran matahari di luar kaidah.



Sumber: Januardi (2024)

Gambar 8.1 Kesalahan Estimasi Prediksi pada Kelembapan (A) dan Durasi Penyinarian (B)

Bab ini dibagi menjadi beberapa subbab. Subbab B mengenalkan ke pembaca beberapa variabel yang ditemui pada prakiraan cuaca. Subbab C memberikan cara dari proses transformasi data, prediksinya, sampai ke uji akurasinya. Dalam Subbab D disampaikan studi kasus transformasi data kelembapan dan durasi penyinaran Kota Bandung yang didasarkan pada data dari Badan Pusat Statistik (2022a, 2022b). Penjelasan lebih rinci terkait ketidakcocokan tanpa transformasi *log-odds* dijelaskan di Subbab E. Subbab F memberikan implifikasi secara teoretis dan manajerial dalam penggunaan transformasi data untuk prediksi cuaca. Terakhir, Subbab G merangkum kajian analisis yang dilakukan.

B. Variabel-Variabel Kasus pada Prakiraan Cuaca

Kelembapan merupakan konsentrasi air yang teruapkan pada udara sekitar. Air yang teruapkan dalam kondisi gas tidak dapat dilihat oleh kasat mata. Tingginya kelembapan akan mengindikasi potensi terjadinya presipitasi yang secara visual dapat terdeteksi dari adanya awan dan kabut (Korotcenkov, 2020). Estimasi kelembapan dapat diketahui melalui kelembapan absolut (*absolute humidity*) dan kelembapan relatif (*relative humidity*). Kelembapan absolut adalah jumlah massa atau volume dari air yang teruapkan per massa atau volume udara kering (gram per kilogram). Kelembapan absolut memiliki tipe data yang terdistribusi normal, sedangkan kelembapan relatif menunjukkan perbandingan jumlah uap air di udara aktual dengan jumlah uap air maksimum yang bisa dikandung oleh udara pada suhu yang sama. Kelembapan relatif ini merupakan salah satu indikator penting untuk memprediksikan cuaca. Cuaca akan tergolong kering apabila kelembapan relatifnya cenderung rendah dan cuaca tergolong basah bila kelembapan relatifnya tinggi. Persamaan untuk mengetahui nilai kelembapan relatif (φ) menurut Rumble (2017) adalah sebagai berikut.

$$\varphi = \frac{p}{p_s} \times 100\% \quad (8.1)$$

Kelembapan relatif (φ) adalah rasio dari tekanan parsial dari uap air di udara (p) dengan tekanan uap jenuh pada udara pada suhu yang tertentu (p_s). Nilai p mengilustrasikan kondisi nyata (*real*) jumlah air yang teruapkan dan nilai p_s adalah potensi penguapan air secara keseluruhan yang tergantung pada kondisi suhunya. Kondisi lingkungan dengan kelembapan relatif yang rendah merupakan implikasi dari rendahnya tekanan parsial p . Selain itu, suhu yang ada akan menentukan jumlah uap air maksimal yang dapat ditampung di udara. Makin tinggi suhu, volume udara meningkat, yang berarti uap air yang dapat ditampung menjadi lebih banyak pula, sedangkan daerah yang memiliki kelembapan relatif tinggi mengindikasikan tingginya tekanan parsial, yang pada titik kritis tertentu mendorong terjadinya proses termodinamika dengan terjadinya perubahan fasa dengan asumsi tidak ada perubahan suhu. Naiknya tekanan parsial uap air sampai melewati titik jenuh berpotensi mengalami kondensasi, uap air menjadi droplet yang membentuk kabut atau awan. Dengan adanya proses penggabungan droplet menjadi tetes air yang lebih besar dan berkecepatan jatuh yang lebih tinggi maka tercipta presipitasi.

Nilai kelembapan relatif menggunakan satuan persentase untuk menggambarkan rasio antara tekanan parsial (p) dengan tekanan uap jenuh air di lingkungan (p_s). Saat bernilai kelembapan relatif bernilai 100%, tekanan parsial akan sama dengan tekanan uap jenuh. Pada titik ini, udara tidak dapat menampung air lagi sehingga tidak akan ada lagi air yang dapat teruapkan. Air pada lingkungan tersebut sudah mencapai titik embun (*dew point*) (Korotcenkov, 2018). Nilai dari kelembapan relatif dapat melebihi 100% yang akan mengakibatkan pembentukan formasi awan tertentu dan terjadinya hujan. Akan tetapi, nilai dari kelembapan relatif tidak mungkin bernilai di bawah 0% karena nilai 0% itu sendiri telah mengartikan tidak ada kesediaan air sama sekali di udara. Pada kenyataannya, tidak ada bagian di bumi ini yang memiliki nilai kelembapan relatif 0% karena 71% dari bumi adalah air.

Ketergantungan kelembapan relatif pada suhu menjadikan kelembapan relatif memiliki sifat yang tidak pasti (*uncertainty*). Meskipun

kandungan air dalam udara tetap, kelembapan relatif dapat berubah jika terjadi perubahan suhu. Pengolahan data kelembapan relatif dapat berbentuk *univariate* di mana pola pemunculan angkanya hanya tergantung dari pola deret waktu (*time series*) dan pola musiman (Nagaraj & Kumar, 2023).

Adapun durasi penyinaran adalah indikator dalam klimatologi untuk mengukur durasi penyinaran matahari dalam sebuah periode (satu hari, bulan, atau tahun) pada lokasi tertentu. Variabel ini juga dapat menjadi indikator keberadaan awan dari sebuah lokasi. Bentuk variabel ini merupakan rasio durasi penyinaran sesungguhnya terhadap maksimum durasi penyinaran di suatu daerah (Rahim et al., 2004). Pada aplikasinya, estimasi dari durasi penyinaran sangat bergantung dari sudut penyinaran dari matahari (*solar altitude*). Menurut Aydinli dan Krochmann (1987), estimasi durasi penyinaran ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$\sigma_n = \left(1 - \frac{0.1}{\tan \gamma_s}\right) \times 100\% \quad \text{untuk } \gamma_s > 10^\circ \quad (8.2)$$

$$\sigma_n = 2.5 \tan \gamma_s \times 100\% \quad \text{untuk } \gamma_s \leq 10^\circ \quad (8.3)$$

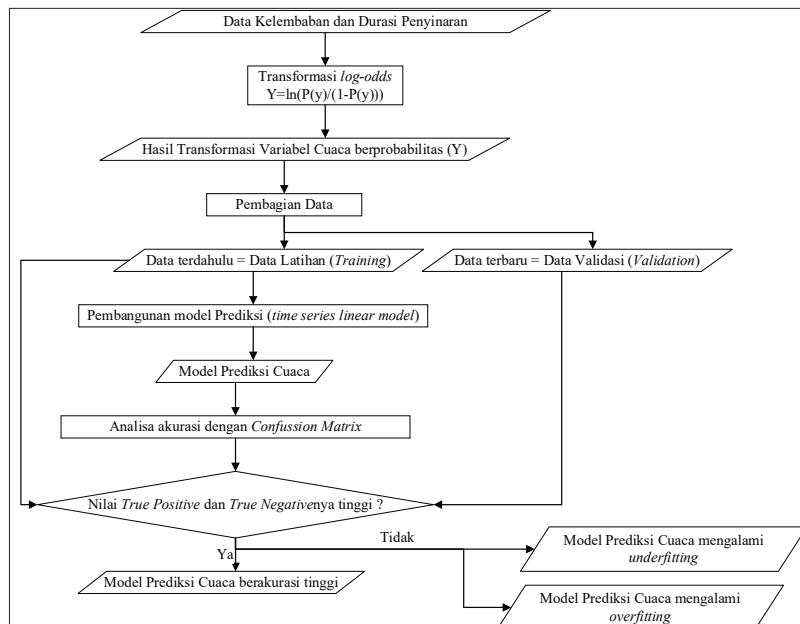
Nilai σ_n memiliki sifat tidak berdimensi (*dimensionless*), tetapi karena analisisnya menyangkut rasio sehingga dapat diklasifikasikan dengan persentase (Johansson, 2010). Lama penyinaran (σ_n) cukup bergantung pada sudut penyinaran dari matahari (γ_s). Jika matahari berada di tegak lurus pada suatu daerah ($\gamma_s \approx 90^\circ$) maka persentase penyinaran matahari akan mendekati 100%. Hal ini yang menyebabkan daerah-daerah ekuator di bumi mendapat penyinaran matahari paling tinggi. Akan tetapi, jika sudut penyinarannya matahari sejajar ($\gamma_s \approx 0^\circ$) maka persentase penyinaran matahari akan mendekati 0%. Hal ini terjadi untuk daerah di kutub selatan. Rendahnya penyinaran matahari menyebabkan suhu menjadi rendah dan dapat mendekati titik beku.

Lama penyinaran matahari sama seperti kelembapan memiliki sifat yang tidak pasti (*uncertain*) dan dapat diprediksi dengan pendekatan univariat menggunakan analisis deret waktu (Santos et al.,

2021). Durasi penyinaran matahari dengan probabilitas suatu daerah akan disinari oleh matahari secara terus menerus ($P(y) \approx 1$) atau memiliki probabilitas tidak disinari oleh matahari secara berkelanjutan ($1 - P(y) \approx 1$) (Maafi & Adane, 1998). Analisis statistika yang dapat dilakukan untuk variabel ini perlu dilakukan transformasi.

C. Proses Pengolahan dan Pengujian Data

Pada bagian ini, proses pengolahan data dari transformasi data, pengembangan model prediksi sampai pengujian data dilakukan. Beberapa proses akan dipertegas sebagai pembeda untuk pengolahan tanpa transformasi dan dengan transformasi, meski keduanya menggunakan model prediksi yang sama, yang dalam contoh ini menggunakan *time series linear model* (TSLM). Alur dari pengolahan data ditunjukkan dengan diagram alir pada Gambar 8.2.



Gambar 8.2 Diagram Alir dari Pengolahan Data Cuaca yang Disertai Transformasi Data

1. Transformasi Log-Odds

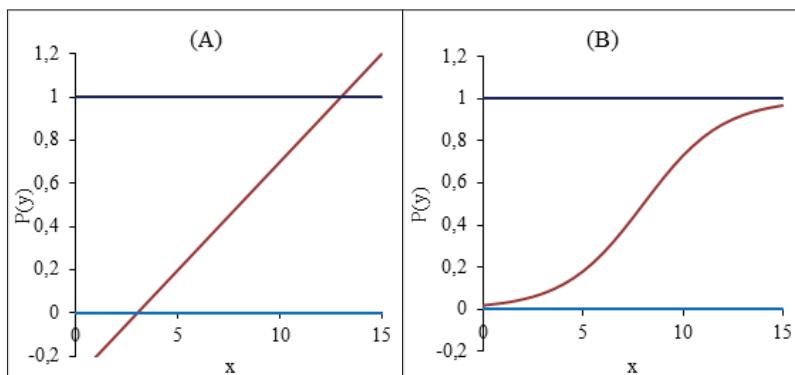
Teknik transformasi data yang digunakan untuk demonstrasi ini adalah fungsi *Log-odds*. Fungsi *log-odds* (*logit*) pada umumnya digunakan oleh pengolah data dan statistikawan untuk mengolah data yang memiliki batasan dan tidak memiliki distribusi normal. Apabila terdapat sebuah data yang memiliki dua jenis kelas (batas atas dan batas bawah), data dapat diklasifikasikan pada suatu kelas dengan probabilitas $P(y)$ atau terkласifikasi pada kelas lain dengan probabilitas $1 - P(y)$ tanpa distribusi normal. Data yang tidak terdistribusi normal, cenderung sulit untuk dianalisis atau diolah. Jika suatu data memiliki rentang nilai 0 sampai 1 $[0,1]$, perlu dilakukan transformasi, salah satunya dengan menggunakan fungsi *log-odds* sehingga memiliki rentang nilai dari minus tak hingga sampai positif tak hingga $[-\infty, \infty]$ dan terdistribusi normal. Transformasi *log-odds* dilakukan dengan fungsi berikut ini menurut Hosmer et al. (2013).

$$Y = \ln\left(\frac{P(y)}{1 - P(y)}\right) \quad (8.4)$$

Probabilitas dari kejadian $x^{(P(x))}$ dapat dijadikan sebuah variabel (Y) dengan logaritma natural. Syaratnya adalah nilai $P(y)$ harus memiliki rentang $0 \leq P(y) \leq 1$. Probabilitas, rasio *odds*, dan *log-odds* bukan merupakan hal yang sama. Ketiga hal ini menggambarkan proses transformasi dari variabel yang sudah ditransformasikan menjadi variabel yang berbeda. Probabilitas menggambarkan kemungkinan sebuah *odds* akan terjadi dalam unit persentase. Rasio *odds* adalah perbandingan antara dua kemungkinan kejadian (*odds*) jika memiliki antara sebuah *odds* terjadi ($P(y)$) dan tidak terjadi ($1 - P(y)$). Kemudian, dengan fungsi *log-odds* kedua *odds* memiliki bias (variansi) dengan rentang $[-\infty, \infty]$ sehingga dapat diaplikasikan metode statistika dasar. Setelah diperoleh nilai yang sudah ditransformasikan (Y), variabel dapat dilakukan transformasi balik (*detransformation*) menggunakan fungsi eksponensial sebagai berikut.

$$P(y) = \frac{e^Y}{1 + e^Y} = \frac{1}{1 + e^{-Y}} \quad (8.5)$$

Esensi dari fungsi *log-odds* adalah rasio antara probabilitas sebuah kejadian x ($P(y)$) terhadap probabilitas selain kejadian kejadian x ($1 - P(y)$). Pemakaian fungsi ini membentuk fungsi *sigmoid* yang berguna untuk mencegah nilai probabilitas yang dihasilkan keluar dari rentang nilai 0 sampai 1 $[0,1]$. Secara grafik model, Gambar 8.2 menunjukkan perbedaan tanpa dan menggunakan transformasi *log-odds*. Berdasarkan hasil fungsi prediksi, bertambah atau berkurangnya variabel bebasnya akan membuat prediksi probabilitas bernilai di luar rentang (Gambar 8.3 A) dan membuat data model yang dihasilkan tidak mengikuti kaidah. Alhasil pengambilan keputusan mengikuti model tanpa transformasi akan sulit. Berbeda halnya dengan proses transformasi *log-odds* (Gambar 8.3 B) yang dapat mencegah sebuah prediksi di luar rentang $[0,1]$ karena penggunaan dari fungsi *sigmoid*.



Sumber: Januardi (2024)

Gambar 8.3 Perbedaan Penggunaan Tanpa (A) dan dengan (B) Transformasi *Log-odds*

Dengan fungsi transformasi *log-odds*, sebuah kemungkinan (*odds*) dapat dimodelkan mengikuti variabel tertentu. Jika dalam sebuah probabilitas kejadian pasti terjadi, $P(y) = 1$ maka kejadian lain tidak akan terjadi $1 - P(y) = 0$. Begitu pula untuk hal sebaliknya. Dengan fungsi logaritmik dari *log-odds* (persamaan 8.4), variabel yang ditransformasikan akan memiliki nilai dengan rentang tak hingga

$[-\infty, \infty]$ sehingga dapat diaplikasi pada statistika dasar. Pembuktian-nya dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$\ln\left(\frac{P(y) = 1}{1 - P(y) = 0}\right) = \ln\left(\frac{1}{0}\right) = \infty \quad (8.6)$$

$$\ln\left(\frac{P(y) = 0}{1 - P(y) = 1}\right) = \ln\left(\frac{0}{1}\right) = -\infty \quad (8.7)$$

Sebuah kemungkinan (*odds*) memiliki probabilitas dengan rentang 0–1. Nilai 1 menggambarkan sebuah *odds* pasti terjadi dan 0 menggambarkan sebuah *odds* pasti tidak terjadi. Logaritma *log-odds* adalah fungsi transformasi dari variabel dengan batasan menjadi variabel kontinu yang dapat mencapai tak terhingga $[-\infty, \infty]$. Data-data kemungkinan ini diperoleh secara statistik dari data historis. Sebagai contoh, probabilitas sebuah daerah akan hujan bernilai 80% maka probabilitas tidak terjadi hujannya adalah 20%. Jika menggunakan *log-odds* maka nilai $\ln(80\% / 20\%)$ akan menjadi 1.38. Nilai *log-odds* ini yang dapat diaplikasikan pada model statistika dasar.

Penggunaan transformasi *log-odds* adalah cara mendasar untuk mengaplikasikan variabel yang memiliki batasan (tidak tak terhingga) pada model statistika dengan proses yang didapat diikuti dalam setiap tahapannya. Selain transformasi *log-odds*, prediksi variabel dapat menggunakan metode *machine learning*, seperti *support vector machine*, pohon klasifikasi (*classification tree*), atau jaringan saraf tiruan (*neural network*). Namun, menurut Rudin (2019), prediksi variabel secara langsung menggunakan *machine learning* akan mengindikasikan kejadian *black box*, di mana hasil prediksi yang dibentuk tidak dapat dimengerti proses pembentukannya (masih bersifat abstrak). Keabstrakan dari sebuah model akan mengakibatkan sulitnya implementasi dari model prediksi untuk proses pengambilan keputusan selanjutnya.

2. Time Series Linear Model

Metode *time series linear model* (TSLM) merupakan pengembangan dari model regresi linear berganda (*multiple linear regression*). Metode TSLM ini memiliki parameter khusus pada variabel waktu ke t dan variabel pada waktu sebelumnya. Penggunaan variabel pada waktu sebelumnya adalah fungsi autoregresif (*autoregressive*) untuk melihat nilai musimannya (*seasonality*). Secara permodelan matematika menurut Paolella (2018), model TSLM ditunjukkan sebagai berikut.

$$f(x) = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 x_{t-1} + \beta_3 x_{t-2} + \dots \quad (8.8)$$

Di mana fungsi dari model TSLM memiliki parameter sebagai *slope* untuk variabel waktu (t) dan variabel univariat terdahulu (x_{t-i}). Penggunaan variabel terdahulu digunakan untuk menjelaskan kemungkinan adanya serial korelasi (*autocorrelation*) pada kestokastikan data deret waktu. Pembentukan model masih menggunakan metode estimasi galat kuadrat terkecil (*least square estimator*). Pada artikel ini, pemakaian metode ini menggunakan fungsi *tslm* pada pemrograman R (Hyndman & Athanasopoulos, 2018).

3. Akurasi Model dengan Confusion Matrix

Prediksi deret waktu memiliki penilaian kinerja model menggunakan analisis galat, seperti *mean square error* (MSE), *mean absolute error* (MAE), *mean absolute percentage error* (MAPE), *root mean square error* (RMSE), dan lainnya. Namun, untuk mengevaluasi hasil kinerja transformasi *log-odds* digunakan metode *confusion matrix* (Hastie et al., 2001). Matriks ini menggunakan analisis akurasi apakah probabilitas yang dihasilkan memenuhi frekuensi tertentu. Persamaan untuk menilai akurasi dari model menurut Sammut dan Webb (2010) adalah sebagai berikut.

$$Akurasi(\%) = \frac{TP_n + TN_n}{n} = \frac{TP_n + TN_n}{TP_n + TN_n + FP_n + FN_n} \quad (8.9)$$

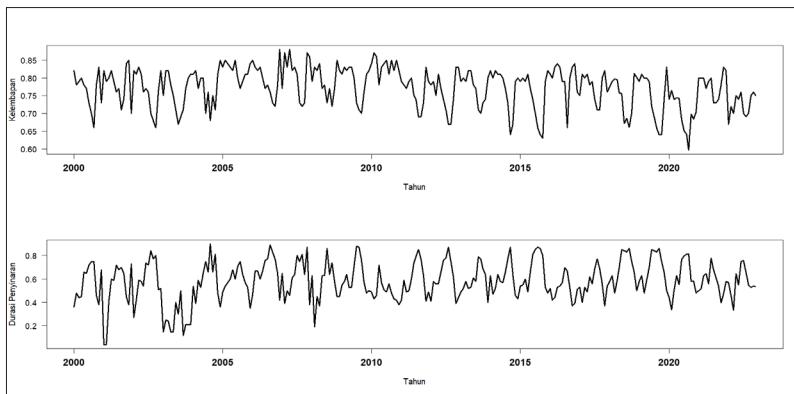
Persamaan akurasi hanya dapat digunakan untuk data yang memiliki batas atas dan batas bawah. Penetapan *threshold* diperlukan untuk mengklasifikasikan data kepada nilai positif (*positive*) atau negatif (*negative*). Keterangan TP_n (*true positive*) adalah kumpulan hasil prediksi model di mana data yang keluar sesuai masuk ke dalam suatu kelas, sedangkan keterangan TN_n (*True Negative*) adalah kumpulan prediksi di mana data yang keluar sesuai masuk ke dalam kelas lain. Nilai merujuk pada jumlah hasil prediksi yang keluar dari model. Tingginya frekuensi TP_n dan TN_n menunjukkan kalau model berhasil untuk memprediksikan sebuah kejadian. Keterangan FP_n (*False Positive*) dan FN_n (*False Negative*) menunjukkan kalau prediksi merujuk ke suatu kelas, padahal keadaan yang sesuai adalah pada kelas lain. Tingginya frekuensi nilai FP_n dan FN_n menunjukkan rendahnya kemampuan model prediksi untuk memprediksikan data.

D. Studi Kasus Kota Bandung

Untuk memudahkan aplikasi dan analisis dari model prediktif variabel pada cuaca, subbab ini menggunakan data cuaca dari Kota Bandung pada tahun 2000 sampai tahun 2022 menurut data dari Badan Pusat Statistik (2022a, 2022b). Kemudian data dipisah menjadi data latihan (*training data*) dan data validasi (*validation data*) menggunakan prinsip *pareto* (Panesar, 2021). Data dari tahun 2000–2021 digunakan untuk membangun model prediksi (data latihan) dan data tahun 2022 dipakai untuk validasi hasil prediksi. Pembuatan model akan dibagi menjadi dua, yaitu model tanpa dan dengan proses transformasi *log-odds*.

1. Data Cuaca Kota Bandung

Data yang dipakai untuk prediksi cuaca adalah data kelembapan dan durasi penyinaran dari Kota Bandung di tahun 2000–2022 (Badan Pusat Statistik, 2022a, 2022b). Penampakan dan statistika deskriptif dari data cuaca Kota Bandung ditunjukkan pada Gambar 8.3.



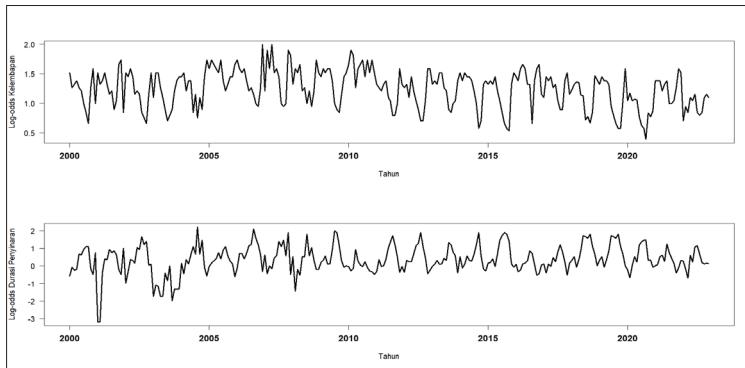
Sumber: BPS (2022a, 2022b)

Gambar 8.4 Data Kelembapan dan Durasi Penyinaran Kota Bandung dari Tahun 2000–2022

Tabel 8.1 Statistika Deskriptif Data Kelembapan dan Durasi Penyinaran Kota Bandung dari Tahun 2000–2022

Parameter	Kelembapan	Durasi Penyinaran
Minimum	0,5969	0,04
Median	0,79	0,58
Rata-rata	0,772	0,5825
Maksimum	0,88	0,9

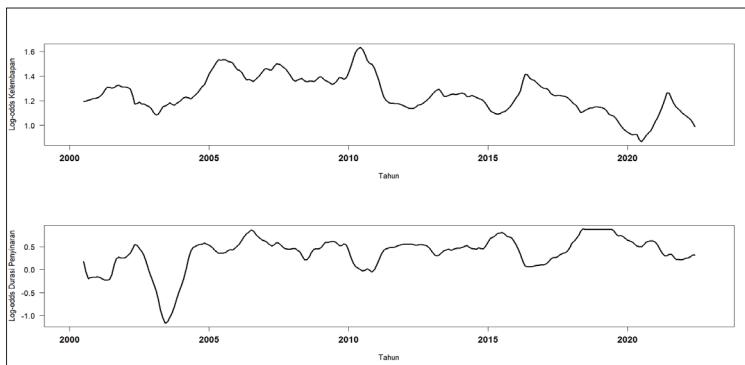
Apabila dilakukan analisis statistika deskriptif, pola data durasi penyinaran memiliki rentang data yang lebih tinggi dibandingkan data kelembapan. Hal ini dapat dilihat dari perbedaan nilai maksimal dan minimalnya pada Tabel 8.1. Data yang ada dilanjutkan untuk transformasikan menggunakan fungsi *log-odds* yang mengikuti persamaan 8.4. Gambar 8.4 menunjukkan hasil transformasi *log-odds*nya.



Sumber: BPS (2022a, 2022b)

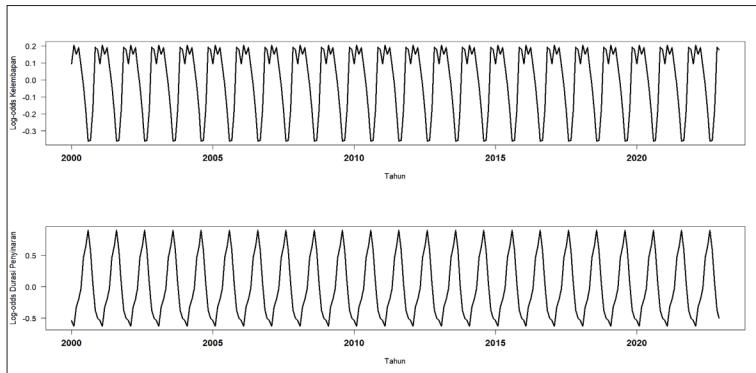
Gambar 8.5 Transformasi *Log-odds* dari Data Kelembapan dan Durasi Penyinaran Kota Bandung dari Tahun 2000–2022

Berdasarkan perbedaan data yang belum ditransformasi (Gambar 8.3) dan yang sudah ditransformasi (Gambar 8.4), tidak menunjukkan pola perbedaan, hanya menunjukkan perbedaan pada nilai rentang dari data. Kemudian, data diurai menggunakan fungsi (*decompose*) pada pemrograman R. Penguraian data deret waktu (*decomposing*) dilakukan untuk menganalisis tren (kecenderungan naik dan turun) dan musiman (pola spesifik setiap musim) (Chatfield & Xing, 2019). Hasilnya adalah sebagai berikut.



Sumber: Januardi (2024)

Gambar 8.6 Analisis Tren dari *Log-odds* Kelembapan dan Durasi Penyinaran Kota Bandung dari Tahun 2000–2022



Sumber: Januardi (2024)

Gambar 8.7 Analisis Musiman (*Seasonality*) dari *Log-odds* Kelembapan dan Durasi Penyinaran Kota Bandung dari Tahun 2000–2022

Hasil dari Gambar 8.5 mengindikasi kondisi stokastik dari *log-odds* kelembapan dan durasi penyinaran. Artinya kedua data tidak menunjukkan kecenderungan naik atau turun. Namun hasil analisis pada Gambar 8.6 menunjukkan bahwa *log-odds* dari kelembapan dan durasi penyinaran memiliki sebuah pola musiman. Setiap lima tahun sekali, Kota Bandung akan mengalami enam kali nilai kelembapan yang tinggi dan lima kali durasi penyinaran yang tinggi. Hal ini mendukung bahwa kedua jenis data merupakan deret waktu dengan pola musiman.

2. Permodelan Prediksi

Setelah data kelembapan dan durasi penyinaran dari Kota Bandung dianalisis, selanjutnya data digunakan untuk membangun model prediksi. Model prediksi yang digunakan adalah *time series linear model* (TSLM) mengikuti persamaan 8.8. Model prediksi kelembapan dan durasi penyinaran dibentuk dengan data yang tanpa transformasi dan dengan transformasi *log-odds*. Model prediksi yang dibangun menggunakan data dari tahun 2000 sampai 2021. Hasil prediksinya akan dilakukan uji akurasi dengan data dari tahun 2022 mengikuti prinsip *pareto*. Hasil estimasi statistik dan hasil pengujian untuk data kelembapan adalah sebagai berikut.

Tabel 8.2 Estimasi Statistik dari Model TSLM Kelembapan

	Tanpa Transformasi ($P(y)$)		Dengan Transformasi ($\ln\left(\frac{P(y)}{1-P(y)}\right)$)	
	Estimasi	P-value	Estimasi	P-value
Model		<0,0001		<0,0001
Intercept	0,8146*	<0,0001	1,4766*	<0,0001
Tren (t)	-0,0001*	<0,0001	-0,0008*	<0,0001
Musiman		<0,0001		<0,0001
Bulan 2	0,0138	0,2634	0,0889	0,2079
Bulan 3	0,0068	0,5833	0,0428	0,5442
Bulan 4	0,0120	0,3296	0,0771	0,2748
Bulan 5	-0,0055	0,6578	-0,0355	0,6149
Bulan 6	-0,0272*	0,03	-0,1540*	0,0297
Bulan 7	-0,0533*	<0,0001	-0,2952*	<0,0001
Bulan 8	-0,0884*	<0,0001	-0,4791*	<0,0001
Bulan 9	-0,0901*	<0,0001	-0,4772*	<0,0001
Bulan 10	-0,0544*	<0,0001	-0,2937*	<0,0001
Bulan 11	0,0097	0,4328	0,0717	0,3101
Bulan 12	0,0071	0,5658	0,0576	0,4144

Keterangan: *Signifikan pada 95%

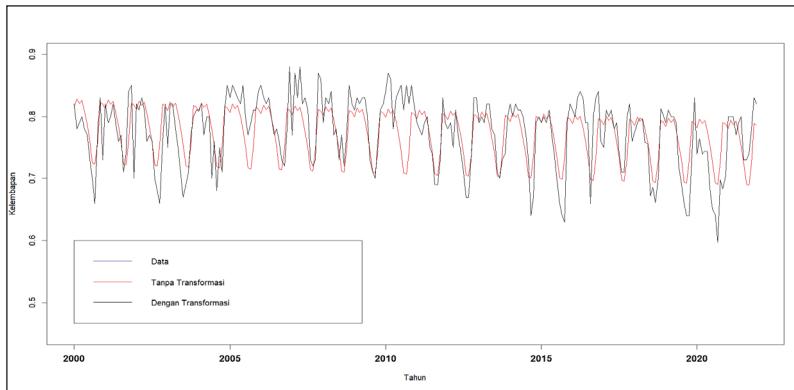
Tabel 8.2 menunjukkan estimasi model statistika prediktif dari kelembapan tanpa dan dengan transformasi *log-odds*. Kedua model menunjukkan hasil signifikansi yang sama. Kedua model memiliki signifikansi musiman pada bulan Juni sampai Oktober untuk prediksi deret waktu kelembapan. Variabel bulan Januari termasuk ke dalam nilai dasar atau *intercept*. Berdasar dari penampakan Tabel 8.2, baik dengan transformasi maupun tanpa transformasi tidak menunjukkan perbedaan pada nilai signifikansi. Tabel selanjutnya menunjukkan hasil estimasi statistik dari data durasi penyinaran.

Tabel 8.3 Estimasi Statistik dari Model TSLM Durasi Penyinaran

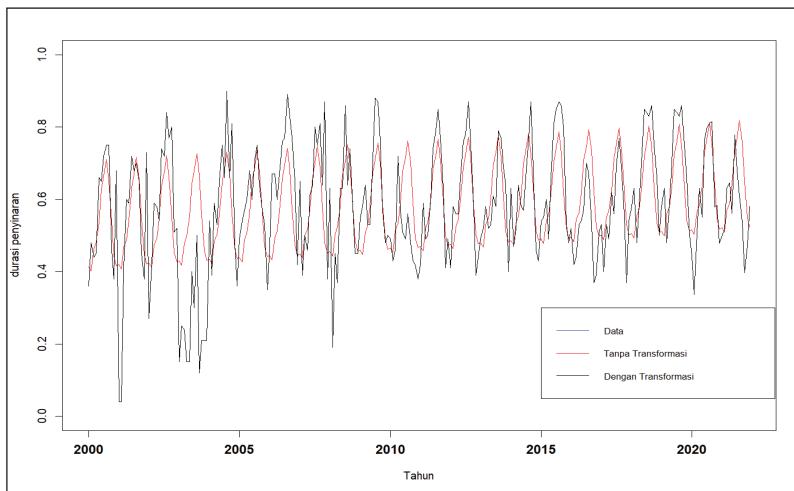
	Tanpa Transformasi ($P(y)$)		Dengan Transformasi ($\ln\left(\frac{P(y)}{1-P(y)}\right)$)	
	Estimasi	P-value	Estimasi	P-value
Model		<0,0001		<0,0001
Intercept	0,4135*	<0,0001	-0,4818*	0,0015
Tren	0,0004*	<0,0001	0,0022*	<0,0001
Musiman		<0,0001		<0,0001
Bulan 2	-0,0123	0,7527	-0,0457	0,8110
Bulan 3	0,0488	0,2106	0,2704	0,1578
Bulan 4	0,0666	0,0880	0,3335	0,0817
Bulan 5	0,1210*	0,0021	0,5583*	0,0038
Bulan 6	0,2110*	<0,0001	1,0027*	<0,0001
Bulan 7	0,2480*	<0,0001	1,2005*	<0,0001
Bulan 8	0,2942*	<0,0001	1,4600*	<0,0001
Bulan 9	0,2347*	<0,0001	1,1340*	<0,0001
Bulan 10	0,1231*	0,0017	0,6041*	0,0017
Bulan 11	0,0249	0,5221	0,1864	0,3299
Bulan 12	-0,0026	0,9462	0,0573	0,7644

Keterangan: *Signifikan pada 95%

Tabel 8.3 adalah model statistika prediktif dari durasi penyinaran yang tanpa dan dengan transformasi *log-odds*. Sama seperti Tabel 8.2, signifikansi kedua model memiliki hasil yang sama. Berbeda dari kelembapan, model prediksi durasi penyinaran hanya signifikan pada bulan Mei sampai Oktober. Setelah model prediksi dibangun untuk variabel kelembapan dan durasi penyinaran, model diteruskan untuk diuji akurasinya menggunakan persamaan 8.9. Akurasi model dibedakan untuk data latihan (*data training*) dan validasi (*data validation*).



Gambar 8.8 Analisis Data Latihan Kelembapan dari Kota Bandung Tahun 2000–2021

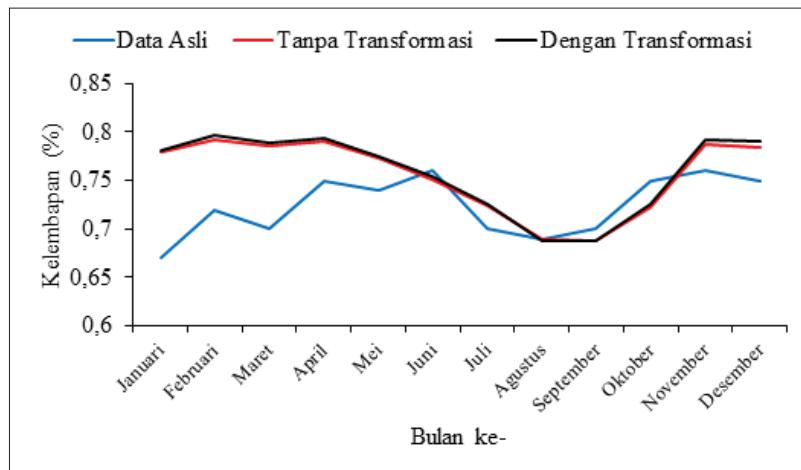


Sumber: Januardi (2024)

Gambar 8.9 Analisis Data Latihan Durasi Penyinaran dari Kota Bandung Tahun 2000–2021

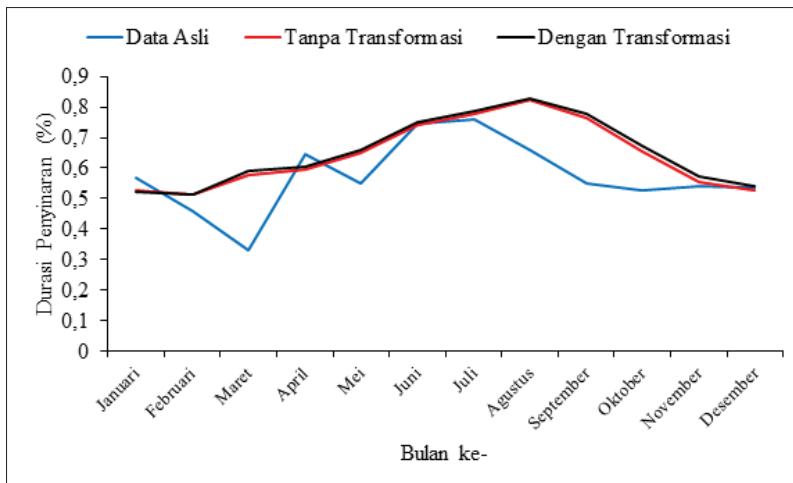
Apabila hasil prediksi kelembapan dan durasi penyinaran dari model tanpa transformasi dan dengan transformasi disejajarkan dengan data latihan (*training*) maka akan dihasilkan grafik, seperti yang tampil di Gambar 8.7 dan Gambar 8.8. Data asli dari tahun 2000–2021

ditunjukan pada garis biru, model prediksi tanpa transformasi dengan garis merah, dan model prediksi dengan transformasi dengan garis bewarna hitam. Secara penampakan, model tanpa transformasi memiliki model yang kurang cocok terhadap data kelembapan, sedangkan model yang sudah ditransformasi *log-odds* memiliki kecocokan data yang sangat tinggi. Hal ini dibuktikan dengan garis biru (data awal) yang tidak terlihat karena tertutupi oleh garis hitam dari model prediksi yang tertransformasi. Indikasi model yang sangat cocok tentunya juga tidak terlalu bagus pada permodelan *machine learning*. Hasil model dari data latihan yang terlalu cocok terhadap datanya, akan mengindikasi kejadian *overfitting*. Kejadian *overfitting* merupakan tingginya kecocokan model prediksi hasil data latihan yang mengakibatkan model tidak dapat memprediksikan data validasi sebagai data di luar latihan (Dobin, 2010). Pemaparan perbandingan data validasi dengan hasil prediksi ditunjukan pada Gambar 8.10.



Sumber: Januardi (2024)

Gambar 8.10 Analisis Data Validasi Kelembapan dari Kota Bandung Tahun 2022



Sumber: Januardi(2024)

Gambar 8.11 Analisis Data Validasi Durasi Penyinaran dari Kota Bandung Tahun 2022

Pernyataan *overfitting* dari hasil data latihan dapat dilihat pada hasil data validasi di Gambar 8.9 dan 8.10. Pada Gambar 8.9, hasil prediksi baik tanpa dan dengan transformasi menunjukkan hasil yang cukup menyimpang pada rentang waktu Januari–April 2022. Namun model dapat mengikuti pola data validasi di saat waktu Mei–Agustus 2022. Hasil prediksi untuk tahun 2022 pada data kelembapan dan durasi penyinaran memiliki data yang lebih halus. Artinya perubahan data setiap bulannya tidak berubah secara tajam. Meski demikian, secara kasat mata, pola grafik dari hasil prediksi tanpa ataupun dengan transformasi memiliki pola yang sama dan hampir mengikuti pola dari data di tahun 2022. Sehingga model prediksi yang dihasilkan dapat digunakan untuk memprediksikan variabel cuaca. Untuk hasil yang lebih akurat, estimasi akurasi data latihan dan validasinya dilakukan menggunakan persamaan 8.9 dan ditunjukkan pada Tabel 8.4.

Tabel 8.4 Akurasi Model Kelembapan

	Tanpa Transformasi ($P(y)$)		Dengan Transformasi ($\ln\left(\frac{P(y)}{1-P(y)}\right)$)	
	Data Latihan (Data Training)	Data Validasi (Data Validation)	Data Latihan (Data Training)	Data Validasi (Data Validation)
True Positive (TP)	25,00%	75,00%	34,09%	75,00%
False Positive (FP)	9,47%	8,33%	0,00%	8,33%
False Negative (FN)	18,56%	8,33%	9,47%	8,33%
True Negative (TN)	46,97%	8,33%	56,44%	8,33%
Akurasi	71,97%	83,33%	90,53%	83,33%

Tabel 8.5 Akurasi Model Durasi Penyinaran

	Tanpa Transformasi ($P(y)$)		Dengan Transformasi ($\ln\left(\frac{P(y)}{1-P(y)}\right)$)	
	Data Latihan (Data Training)	Data Validasi (Data Validation)	Data Latihan (Data Training)	Data Validasi (Data Validation)
True Positive (TP)	45,45%	66,67%	43,56%	75,00%
False Positive (FP)	8,71%	16,67%	0,00%	8,33%
False Negative (FN)	14,02%	0,00%	2,27%	8,33%
True Negative (TN)	31,82%	16,67%	54,17%	8,33%
Akurasi	77,27%	83,33%	97,73%	83,33%

Pada model tanpa transformasi untuk prediksi kelembapan dan durasi penyinaran di Tabel 8.4 dan 8.5, prediksi data latihan (*training*) memiliki nilai akurasi yang lebih rendah dibandingkan akurasi data validasi. Hasilnya model menunjukkan hasil yang cukup bagus di mana kemampuan model TSLM dapat memprediksi data-data di luar analisis (*outlier*), sedangkan pada model dengan transformasi, hasil data latihan (*training*) memiliki nilai akurasi yang lebih tinggi dibandingkan data validasi. Indikasinya adalah transformasi *log-odds* memperkecil nilai variansi dari data. Alhasil, kemampuannya untuk memprediksi data *outlier* tidak terlalu bagus. Hal ini mungkin

akan mengindikasikan kondisi *overfitting*. Akan tetapi, apabila variansi data tidak dipertimbangkan (pada model tanpa transformasi), indikasi kesalahan prediksi dapat terjadi untuk data yang memiliki variansi cukup tinggi. Hal ini dibuktikan pada Gambar 8.1.

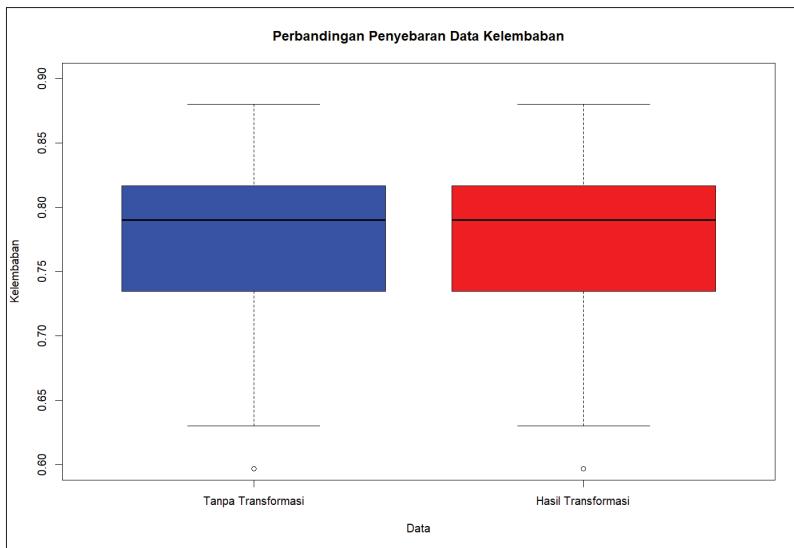
Dari hasil penilaian keakuratan data latihan dan validasi dari model yang tanpa dan dengan transformasi *log-odds*, beberapa hal menarik ditemukan pada data kelembapan dan durasi penyinaran. Pada data latihan, akurasi model dengan transformasi *log-odds* menunjukkan keakuratan yang cukup tinggi dibanding dengan model yang tanpa transformasi. Hal ini membuktikan bahwa proses transformasi akan mempertajam akurasi dari variabel untuk prediksi cuaca. Tabel 8.4 dan Tabel 8.5 juga menunjukkan bahwa model tanpa dan dengan transformasi menunjukkan keakuratan yang sama dari data validasi. Dengan demikian, apabila dipertimbangkan, dengan keakuratan data validasi yang sama dan memiliki keakuratan data latihan yang lebih tinggi, model dengan transformasi jauh lebih unggul dibanding dengan model tanpa proses transformasi *log-odds*.

E. Ketidakcocokan Model Tanpa Transformasi *Log-odds*

Setelah dilakukan aplikasi dan analisis prediksi dari variabel pada cuaca di subbab sebelumnya, subbab ini akan menjelaskan beberapa alasan perlunya proses transformasi *log-odds* untuk variabel tertentu di cuaca.

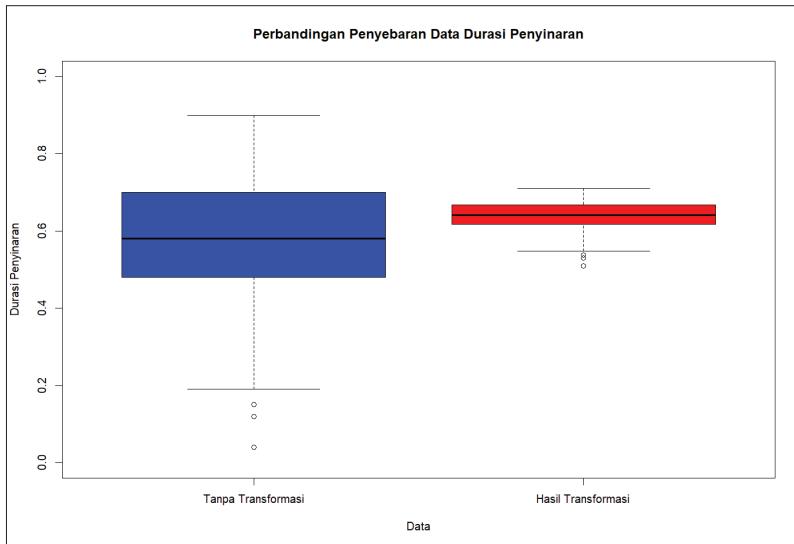
1. Penyebaran Data

Data yang langsung diaplikasikan model prediksi tanpa transformasi *log-odds* dapat memiliki pola penyebaran data yang cukup besar. Hal ini berkaitan dengan pola distribusi data yang cenderung tidak memiliki batas. Tidak seperti data berprobabilitas dengan rentang 0–1. Sebagai contoh, data dari kelembapan dan durasi penyinaran Kota Bandung dari tahun 2000–2022 dibentuk dalam *boxplot* berikut (Gambar 8.12 dan Gambar 8.13).



Sumber: Januardi (2024)

Gambar 8.12 Boxplot dari Kelembapan Kota Bandung Tahun 2000–2022



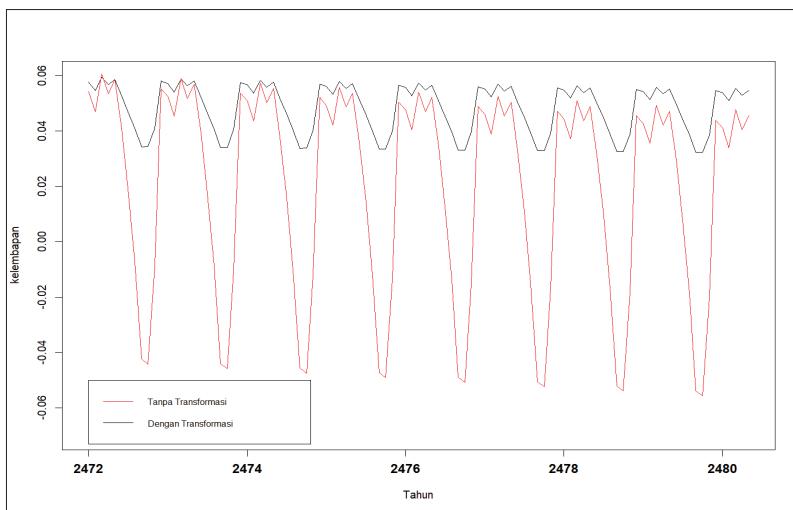
Sumber: Januardi (2024)

Gambar 8.13 Boxplot dari Durasi Penyinaran Kota Bandung Tahun 2000–2022

Grafik *boxplot* adalah alat statistika untuk menggambarkan penyebaran sebuah data dari nilai median, kuartil ke 2 dan 3, serta nilai minimum dan maksimalnya. Grafik ini cukup ampuh untuk melihat seberapa luas penyebaran data dari sampel (Black, 2023). Analisis *boxplot* yang dilakukan pada data kelembapan dan durasi penyinaran kota Bandung dari tahun 2000 sampai 2022 menghasilkan beberapa temuan. Data kelembapan baik yang tanpa dan dengan transformasi *log-odds* menunjukkan pola penyebaran data yang sama. Jarak data kelembapan memiliki rentang yang lebih pendek sehingga analisis hasilnya lebih mudah. Berbeda dari data kelembapan, data durasi penyinaran memiliki rentang data yang lebih besar. Alhasil perbedaan antara tanpa dan dengan transformasi *log-odds* cukup terlihat. Transformasi *log-odds* berguna untuk menjaga prediksi sebuah probabilitas untuk di rentang yang logis.

2. Prediksi yang Salah

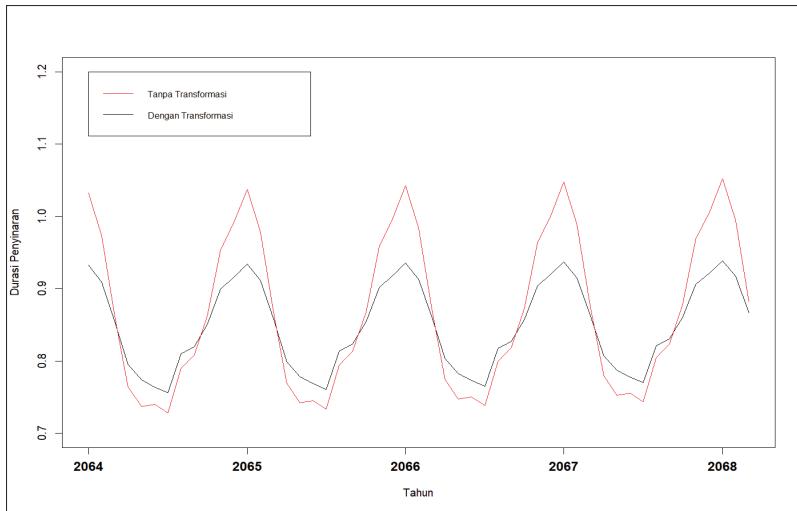
Prediksi deret waktu untuk jangka waktu yang lebih panjang (*longer sequence time series*) memiliki ketidakpastian (*uncertainty*) data yang cukup tinggi. Alhasil yang akan terjadi adalah nilai galat (*error*) yang dihasilkan juga akan lebih tinggi (Petropoulos et al., 2022). Kemungkinan linearitas data untuk waktu dalam jangka waktu ke depan dapat tidak terjadi. Hal ini mengindikasikan perlunya model *nonlinear* untuk aplikasi deret waktu. Namun, prediksi jangka waktu panjang tetap diperlukan untuk melihat pola data ke depannya. Karena kemungkinan hasil prediksi model dan data jangka waktu ke depan bernilai panjang memiliki nilai hampir 0, prediksi sebuah data deret waktu sangat dianjurkan untuk jangka waktu pendek. Setelah penjelasan untuk pola penyebaran suatu data dari model tanpa dan dengan transformasi *log-odds*, analisis dilanjutkan untuk prediksi cuaca. Kelembapan dan durasi penyinaran dilakukan prediksi untuk beberapa tahun ke depan di luar tahun 2022. Prediksi dilakukan untuk melihat kemungkinan sebuah data bernilai diluar rentang 0–1. Meskipun prediksi dilakukan untuk jangka waktu panjang, hasil prediksi hanya mengobservasi kemungkinan hasil prediksi di luar rentang variabel. Penampakan dari hasil prediksi kelembapan untuk tahun 2472 dilampirkan pada Gambar 8.14.



Sumber: Januardi (2024)

Gambar 8.14 Prediksi Kelembapan Kota Bandung Tahun 2472–2480

Prediksi kelembapan menemukan titik observasi yang menarik pada amatan di tahun 2472. Model tanpa transformasi akan memprediksikan kelembapan bernilai kurang dari 0. Nilai kelembapan relatif bernilai kurang dari 0 akan menyalahi kaidah matematika. Kelembapan yang bernilai kurang dari 0 menandakan sebuah daerah sangat kering (tanpa ada kadar air sama sekali) yang cukup mustahil terjadi di muka bumi. Hal ini menyebabkan tidak disarankannya penggunaan variabel cuaca tanpa melakukan proses transformasi *log-odds*. Namun, keuntungan dari data kelembapan Kota Bandung adalah memiliki rentang nilai yang cukup rendah antara 60%–80% (menurut Tabel 8.1). Hal ini yang menyebabkan penyebaran data antara model tanpa dan dengan transformasi *log-odds* penyebarannya tidak berbeda jauh (Gambar 8.11). Apabila model kelembapan masih menggunakan model tanpa transformasi, lebih baik untuk aplikasi jangka waktu pendek.



Sumber: Januardi (2024)

Gambar 8.15 Prediksi Durasi Penyinaran Kota Bandung Tahun 2064–2068

Setelah variabel kelembapan, variabel cuaca yang dilakukan prediksi jangka waktu panjang adalah durasi penyinaran. Terlihat dari Gambar 8.15, jika prediksi durasi penyinaran diteruskan sampai tahun 2064, nilai durasi penyinaran akan melebihi 1. Hal ini juga menyebabkan data yang dihasilkan tidak memenuhi kaidah matematika (durasi penyinaran yang melebihi 100%). Mengikuti Persamaan 8.2 dan 8.3, beragamnya penetapan sudut penyinaran matahari juga membuat nilai durasi penyinaran tidak melebih 100%. Penyinaran yang melebihi 100% menekankan bahwa sebuah daerah akan mengalami penyinaran secara terus menerus di atas cakupan penyinarannya. Hal ini cukup mustahil karena sebuah daerah akan mengalami siklus penyinaran yang tidak terus-menerus. Oleh karena itu, artikel ini menunjukkan bahwa perlunya proses transformasi *log-odds* terkhusus untuk variabel di cuaca. Hal ini bertujuan untuk mencegah hasil prediksi berada di luar rentang kaidah matematika yang sudah ditetapkan.

F. Implifikasi Teoretis dan Manajerial

Subbab ini akan menjelaskan berbagai implifikasi penggunaan transformasi *log-odds* untuk variabel pada cuaca secara teoretis dan manajerial. Secara teoretis, implifikasi dijelaskan menggunakan kaidah-kaidah matematika dan statistika, sedangkan secara manajerial, implifikasi dijelaskan kegunaannya untuk para praktisi, pemerhati, dan pemangku kebijakan ketahanan pangan.

1. Implifikasi Teoretis

Prediksi variabel cuaca, untuk variabel kelembapan dan durasi penyiranan, perlu memiliki batasan (batas atas batas bawah). Tanpa dilakukan pembatasan (*constraint effort*), hasil prediksi akan menghasilkan nilai yang di luar kaidah. Dalam proses pengambilan keputusan dan kebijakan, estimasi yang memenuhi kaidah matematika dan statistika sangat penting dan krusial. Bahasan ini perlu ditekankan untuk meyakinkan kepada pembaca agar melakukan proses transformasi *log-odds* terkhusus untuk variabel cuaca tertentu. Hal ini dibuktikan dari analisis pada Subbab E di mana hasil prediksi tanpa proses transformasi akan menghasilkan nilai yang di luar kaidah. Jika nilai yang dihasilkan di luar dari kaidah matematika dan statistika, proses selanjutnya akan sulit untuk dilakukan.

Sebuah penelitian dari Nagarajan dan Minu (2018) tentang penyemprotan tanaman pangan berbasis kelembapan menggunakan sensor dan prediksi kelembapan untuk penjadwalan penyemprotan saat kelembapan rendah. Apabila model tanpa transformasi diaplikasikan pada teknologi dari penelitian Nagarajan dan Minu (2018), kemungkinan sistem tidak berjalan akan tinggi karena dalam penetapan variabel kelembapan, kelembapan akan diatur dalam rentang tertentu. Jika prediksi kelembapan yang di luar kaidah ditetapkan pada sistem maka penyemprotan otomatis tidak terjadi atau terjadi namun dengan jumlah yang banyak (karena sistem membaca kelembapan yang sangat rendah di bawah 0). Ketidaksesuaian penyemprotan akan menurunkan kinerja dari pertumbuhan tanaman pangan.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Saadon et al. (2021) mengembangkan pembukaan atap sebuah rumah kaca (*greenhouse*) untuk tanaman pangan yang cukup sensitif terhadap perubahan suhu. Saat durasi penyinaran memiliki derajat yang tinggi, atap akan terbuka untuk penyinaran langsung dari matahari. Prediksi dari model tanpa transformasi *log-odds* pada Subbab E menunjukkan bahwa prediksi dapat bernilai lebih dari satu. Jika model prediksi ini diaplikasikan pada sistem rumah kaca dari penelitian Saadon et al. (2021), penyesuaian sudut atap tidak akan berjalan karena ketidaksesuaian nilai durasi penyinarannya. Seperti yang diketahui dari persamaan 8.2 dan persamaan 8.3, durasi penyinaran (σ_n) memiliki signifikansi yang tinggi terhadap sudut matahari (γ_s). Nilai prediksi yang melebihi satu akan membuat atap terus terbuka dan memperbesar laju evaporasi dari tanaman pangan (Choab et al., 2021). Hasilnya nutrisi akan teruapkan dan menurunkan performa tanaman pangan untuk berproduksi.

2. Implifikasi Manajerial

Perubahan iklim yang cukup ekstrem dan tingginya ketidakpastian (*uncertainty*) dari prakiraan cuaca (Jeantet et al., 2023) akan menjadi tantangan ke depannya untuk praktisi, petani, pemerhati, dan pemangku kebijakan untuk ketahanan pangan. Tidak seperti komoditas lainnya, tanaman pangan termasuk komoditas yang sensitif terhadap perubahan lingkungan. Beberapa komoditas pangan, seperti apel (Choab et al., 2021) cukup sensitif terhadap suhu. Tingginya suhu akan mempercepat reaksi kimia dari apel yang mempercepat tingkat kematangan buahnya. Dengan adanya perubahan iklim yang mengarah kepada cuaca bersuhu tinggi dan kering, kematangan buah nantinya akan lebih cepat. Cepatnya kematangan buah berdampak kepada penyesuaian kapasitas panen atau produksi yang juga harus bersifat cepat. Selain itu, keringnya cuaca akan mempercepat laju evaporasi dari tanaman pangan. Alhasil tanaman pangan yang matang akan dipanen dengan nutrisi yang rendah. Dari hal ini perlunya prediksi cuaca yang akurat dan tepat untuk proses pemanenan tanaman pangan yang lebih efektif dan efisien.

Kelembapan adalah salah satu variabel di prakiraan cuaca. Pentingnya prediksi yang akurat untuk variabel ini agar mengetahui waktu tepat untuk penyemprotan tanaman. Pada proses penanaman tanaman pangan, petani perlu mengetahui waktu saat kelembapan akan rendah. Rendahnya kelembapan mengartikan rendahnya kandungan air di udara sekitar dan akan mempercepat laju evaporasi dari tanaman (Liang et al., 2020). Pada prediksi di Kota Bandung, ada sekitar 5 periode dalam 5 tahun, daerah tersebut akan mengalami kelembapan yang cukup rendah. Dengan mengetahui secara akurat estimasi prediksi kelembapan akan rendah maka petani dapat menjadwalkan penyemprotan tanaman pangan lebih baik dan optimal. Prediksi kelembapan juga harus disesuaikan dengan kaidah matematika dan statistika. Hal ini berguna untuk proses pengambilan keputusan yang lebih mudah untuk diproses, dibandingkan data-data prediksi yang tidak memenuhi kaidah metematika.

Selain kelembapan, artikel ini juga membahas durasi penyinaran sebagai variabel dalam prakiraan cuaca. Prediksi durasi penyinaran juga sama pentingnya untuk para petani dalam menjadwalkan penyemprotan disaat durasi penyinaran mendekati 100%. Saat matahari memiliki durasi penyinaran yang tinggi, suhu dari lingkungan juga akan tinggi (Bartoszek & Matuszko, 2021). Tingginya suhu akan mempercepat evaporasi dari air dan nutrisi tanaman. Hal ini yang menyebabkan petani akan melakukan penyemprotan disaat durasi penyinaran yang tinggi. Selain itu, untuk tanaman pangan yang terkhusus dikembangkan di rumah kaca (*greenhouse*), durasi penyinaran perlu diketahui untuk mengatur kapasitas dan ventilasi dari rumah kaca. Tingginya durasi penyinaran akan memperkecil ventilasi untuk mengurangi laju evaporasi. Durasi penyinaran yang tinggi juga akan membuat petani untuk menambah kapasitas rumah kaca agar energi panas yang tercipta menyebar secara keseluruhan (tidak terfokus pada satu tempat). Sama seperti kelembapan, durasi penyinaran di kota Bandung memiliki probabilitas tinggi sebanyak 5 kali dalam 5 tahun.

Perubahan iklim dan cuaca yang tidak menentu mendorong beberapa peneliti dan akademisi untuk menciptakan teknologi dan

model prediksi cuaca untuk mengantisipasi ketahanan pangan (*food security*). Sensitivitas tanaman pangan terhadap cuaca dan lingkungan mendorong peneliti untuk memprediksi cuaca dalam waktu berjangka pendek dan panjang. Selain untuk kegiatan operasional dalam penanaman tanaman pangan, seperti waktu penyiraman dan pengaturan ventilasi dari rumah kaca, prediksi cuaca dapat juga berguna untuk perencanaan kapasitas dan waktu pembibitan tanaman pangan. Prediksi deret waktu pada cuaca yang berkelembapan tinggi dan durasi penyiraman rendah menjadi waktu yang tepat untuk melakukan pembibitan tanaman karena laju evaporasi dari wilayah tersebut akan rendah. Juga mengetahui rata-rata kelembapan dan durasi penyiraman untuk tahun-tahun berikutnya akan berguna untuk perencanaan pemakaian sawah atau kebun terbuka atau rumah kaca untuk menanam tanaman pangan. Prediksi yang tidak memenuhi kaidah matematika dan statistika seperti model tanpa transformasi *log-odds* akan menyulitkan proses pengambilan keputusan kegiatan yang disebutkan.

G. Penutup

Bab ini telah menguraikan teknik transformasi data pada prakiraan cuaca dengan fungsi *log-odds*. Contoh pengolahan data kelembapan relatif dan durasi penyiraman, telah menunjukkan bahwa transformasi *log-odds* dapat membantu proses prediksi dalam mengikuti kaidah ataupun kriteria parameter iklim. Tanpa transformasi *log-odds*, data prediksi menunjukkan adanya nilai negatif dari kelembapan relatif dan nilai yang melebihi 100% dari durasi penyiraman. Padahal, dalam perhitungan data aktual, nilai negatif dari kelembapan relatif dan nilai durasi penyiraman yang lebih tinggi dari 100%, tidak mungkin terjadi. Hal ini dapat dicermati kembali dari pengertian masing-masing parameter. Namun, keberhasilan metode transformasi *log-odds* dalam "memandu" nilai prediksi agar sesuai dengan kaidah matematis parameter kelembapan relatif dan durasi penyiraman, tidak berarti bahwa metode tersebut berkontribusi pada peningkatan akurasi maupun resolusi data. Antara data prediksi dengan transformasi dan tanpa

transformasi, keduanya memiliki pola yang sama dengan deviasi yang relatif kecil.

Apabila dicermati, kemampuan "menangkap" pola musiman dari kedua parameter tersebut, mungkin ditentukan oleh model TSLM. Pada saat melakukan *training* dengan periode 2000–2021, terjadi *overfitting* antara data awal dengan hasil prediksi dengan transformasi. Namun, model TSLM gagal ketika dilakukan validasi untuk periode 2022. Kegagalan tersebut terlihat dari dua hal, yaitu dari pola yang terbentuk dan nilai hasil prediksi jangka panjang yang berada di luar kaidah. Oleh karena itu, terdapat peluang diperoleh hasil yang lebih optimal apabila digunakan perpaduan metode proyeksi dan transformasi yang tepat, melalui serangkaian proses pemilihan model.

Model dan prediksi iklim berbasis statistik, memang pada umumnya, tidak dapat sebaik model-model dinamis yang telah mempertimbangkan proses-proses fisis yang kompleks yang terjadi di alam, tetapi dalam beberapa kasus, model dan prediksi iklim berbasis statistik yang "penuh dengan penyederhanaan" tetap diperlukan. Analisis deret waktu untuk prediksi kelembapan relatif dan durasi penyinaran yang menjadi contoh dalam demonstrasi ini, menunjukkan banyak keterbatasan hasil karena terlalu banyak asumsi yang digunakan. Namun, penggunaan model-model prediksi nonlinear (dengan *time series logistic regression*, jaringan saraf tiruan (*artificial neural network*), mesin pendukung vektor (*support vector machine*), klasifikasi berbasis pohon (*classification-based tree*), dan lainnya) memiliki peluang untuk menghasilkan akurasi yang lebih tinggi. Selain itu, penggunaan variabel cuaca lainnya dengan tipe kejadian atau kelas yang lain akan lebih menantang karena kekompleksitasan proses fisisnya yang perlu dipertimbangkan dalam pemodelan iklim dan cuaca.

Referensi

- Aydinli, S., & Krochmann, J. (1987). Guide on daylighting of building interiors. Dalam *Data on daylight and solar radiation, Draft, CIE*.
- Badan Pusat Statistik. (2022a). *Kelembapan udara per bulan di Kota Bandung (persen), 2020-2022*. BPS. <https://bandungkota.bps.go.id/indicator/151/1249/1/kelembapan-udara-per-bulan-di-kota-bandung.html>
- Badan Pusat Statistik. (2022b). *Penyinaran matahari per bulan di Kota Bandung (Persen), 2020-2022*. BPS. <https://bandungkota.bps.go.id/indicator/151/1250/1/penyinaran-matahari-per-bulan-di-kota-bandung.html>
- Bartoszek, K., & Matuszko, D. (2021). The influence of atmospheric circulation over Central Europe on the long-term variability of sunshine duration and air temperature in Poland. *Atmospheric Research*, 251(December 2020), 105427. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105427>
- Black, K. (2023). *Business statistics: For contemporary decision making*. John Wiley & Sons.
- Chatfield, C., & Xing, H. (2019). *The analysis of time series: An introduction with R*. CRC Press.
- Choab, N., Allouhi, A., Maakoul, A. El, Kousksou, T., Saadeddine, S., & Jamil, A. (2021). Effect of greenhouse design parameters on the heating and cooling requirement of greenhouses in Moroccan climatic conditions. *IEEE Access*, 9, 2986–3003. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047851>
- Dobin, A. (2010). Data mining techniques for the life sciences. Dalam O. Carugo & F. Eisenhaber (Eds.), *Springer protocols - methods in molecular biology 609* (Vol. 609, Issue January 2010). Humana Press. <https://doi.org/10.1007/978-1-60327-241-4>
- Hastie, T., Friedman, J., & Tibshirani, R. (2001). Additive models, trees, and related methods. Dalam *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction* (257–298). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-21606-5_9
- Heino, M., Kinnunen, P., Anderson, W., Ray, D. K., Puma, M. J., Varis, O., Siebert, S., & Kummu, M. (2023). Increased probability of hot and dry weather extremes during the growing season threatens global crop yields. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29378-2>

- Hosmer, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied logistic regression* (3rd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118548387>
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and practice*. Otexts. <https://otexts.com/fpp2/>
- Jeantet, A., Thirel, G., Lemaitre-Basset, T., & Tournebize, J. (2023). Uncertainty propagation in a modelling chain of climate change impact for a representative French drainage site. *Hydrological Sciences Journal*, 68(10), 1426–1442. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.203322>
- Johansson, I. (2010). Metrological thinking needs the notions of parametric quantities, units and dimensions. *Metrologia*, 47(3), 219–230. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/47/3/012>
- Korotcenkov, G. (2018). *Handbook of humidity measurement, Volume 1: Spectroscopic methods of humidity measurement*. CRC Press.
- Korotcenkov, G. (2020). *Handbook of Humidity Measurement, Volume 3: Sensing materials and technologies*. CRC Press.
- Liang, Y., Tabler, G. T., & Dridi, S. (2020). Sprinkler technology improves broiler production sustainability: From stress alleviation to water usage conservation: A mini review. *Frontiers in Veterinary Science*, 7(9), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.544814>
- Maafi, A., & Adane, A. (1998). Analysis of the performances of the first-order two-state Markov model using solar radiation properties. *Renewable Energy*, 13(2), 175–193. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(97\)00094-3](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(97)00094-3)
- McClymont, H., Si, X., & Hu, W. (2023). Using weather factors and Google data to predict COVID-19 transmission in Melbourne, Australia: A time-series predictive model. *Heliyon*, 9(3), artikel e13782. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13782>
- Nagaraj, R., & Kumar, L. S. (2023). Univariate deep learning models for prediction of daily average temperature and relative humidity: The case study of Chennai, India. *Journal of Earth System Science*, 132(3). <https://doi.org/10.1007/S-12040-023-02122-0>
- Nagarajan, G., & Minu, R. I. (2018). Wireless soil monitoring sensor for sprinkler irrigation automation system. *Wireless Personal Communications*, 98(2), 1835–1851. <https://doi.org/10.1007/S-11277-017-4948-y>

- Panesar, A. (2021). Machine learning algorithms. Dalam *Machine learning and AI for healthcare* (85–144). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6537-6_4
- Paoletta, M. S. (2018). *Linear models and time-series analysis: Regression, ANOVA, ARMA and GARCH*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119432036>
- Petropoulos, F., Apiletti, D., Assimakopoulos, V., Babai, M. Z., Barrow, D. K., Ben Taieb, S., Bergmeir, C., Bessa, R. J., Bijak, J., Boylan, J. E., Browell, J., Carnevale, C., Castle, J. L., Cirillo, P., Clements, M. P., Cordeiro, C., Cyrino Oliveira, F. L., De Baets, S., Dokumentov, A., ... Ziel, F. (2022). Forecasting: Theory and practice. *International Journal of Forecasting*, 38(3), 705–871. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.11.001>
- Rahim, R., Baharuddin, & Mulyadi, R. (2004). Classification of daylight and radiation data into three sky conditions by cloud ratio and sunshine duration. *Energy and Buildings*, 36(7), 660–666. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.012>
- Rudin, C. (2019). Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nature Machine Intelligence*, 1(5), 206–215. <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0048-x>
- Rumble, J. (Ed.). (2017). *CRC handbook of chemistry and physics* (98th ed.). CRC Press.
- Saadon, T., Lazarovitch, N., Jerszurki, D., & Tas, E. (2021). Predicting net radiation in naturally ventilated greenhouses based on outside global solar radiation for reference evapotranspiration estimation. *Agricultural Water Management*, 257(August), 107102. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107102>
- Sammut, C., & Webb, G. I. (Ed.). (2010). *Encyclopedia of machine learning*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-30164-8>
- Santos, C. M. dos, Escobedo, J. F., de Souza, A., da Silva, M. B. P., & Aristone, F. (2021). Prediction of solar direct beam transmittance derived from global irradiation and sunshine duration using anfis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(55), 27905–27921. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.044>

- Sridhara, S., Manoj, K. N., Gopakkali, P., Kashyap, G. R., Das, B., Singh, K. K., & Srivastava, A. K. (2023). Evaluation of machine learning approaches for prediction of pigeon pea yield based on weather parameters in India. *International Journal of Biometeorology*, 67(1), 165–180. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02396-x>
- Tabari, H., & Willems, P. (2023). Global risk assessment of compound hot-dry events in the context of future climate change and socioeconomic factors. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00401-7>

Bab IX

Pemodelan Ekstrapolasi Profil Kelembapan dari Pengamatan GNSS-RO untuk Estimasi Total Kandungan Uap Air Atmosfer dalam Mendukung Sistem Prediksi Iklim untuk Ketahanan Pangan

Noersomadi

Dalam bab-bab sebelumnya telah dibahas bahwa cuaca dan iklim sangat berpengaruh pada produktivitas pertanian dan ketahanan pangan Indonesia. Efektivitas kebijakan dan strategi sektor pertanian untuk meningkatkan jumlah panen sangat ditentukan oleh akurasi prediksi cuaca dan iklim. Berbagai upaya telah dilakukan oleh Indonesia untuk membangun sistem prediksi iklim dan cuaca yang lebih baik, mulai dari pengkajian berbagai model iklim yang sesuai untuk wilayah tropis sampai pada operasionalisasi analisis dan prediksi musim di Indonesia. Tentunya, upaya-upaya tersebut tidak berhenti begitu saja. Berbagai riset terus dilakukan untuk meningkatkan akurasi dan resolusi, baik itu secara spasial maupun temporal.

Model-model iklim dan cuaca di dunia terus mengalami perkembangan. Hal tersebut sejalan dengan inovasi dalam sistem observasi

Noersomadi

Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail:* noersomadi@brin.go.id

© 2024 Editor & Penulis

Noersomadi. (2024). Pemodelan ekstrapolasi profil kelembapan dari pengamatan GNSS-RO untuk estimasi total kandungan uap air atmosfer dalam mendukung sistem prediksi iklim untuk ketahanan pangan. Dalam D. E. Nuryanto & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (263–289). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1244.c1393. E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

yang memberi kontribusi pada peningkatan akurasi pengukuran parameter iklim dan atmosfer secara vertikal dan horizontal. Hal ini penting dalam sistem parameterisasi model iklim dan cuaca. Bab ini menguraikan Pemodelan Ekstrapolasi Profil Kelembapan dari Pengamatan GNSS-RO untuk Estimasi Total Kandungan Uap Air Atmosfer untuk kasus di Indonesia, yang dimulai dari kompleksitas dinamika atmosfer di wilayah Benua Maritim Indonesia (BMI) yang menunjukkan pentingnya pengamatan profil kelembapan dalam memperbaiki kinerja model iklim dan atmosfer di Indonesia.

A. Dinamika Atmosfer Tropis

Kondisi atmosfer di wilayah Benua Maritim Indonesia (BMI) merupakan salah satu penggerak utama dinamika atmosfer regional ataupun global. Hal tersebut karena posisi geografis wilayah BMI di ekuator dan di antara Samudra Hindia di barat dan Samudra Pasifik di timur, serta di tengah antara daratan luas Asia di utara dan Australia di selatan. Adanya interaksi lautan, dataran dan atmosfer, menjadikan Indonesia memiliki dinamika atmosfer dan cuaca yang kompleks. Dinamika atmosfer tropis meliputi berbagai macam skala ditinjau dari dimensi ruang dan waktu (The COMET Program). Skala terpendek adalah fenomena turbulen dengan orde menit. Hujan badai memiliki orde jam-an, sedangkan klaster awan yang terorganisasi berskala harian. Gelombang planeter atmosfer ekuatorial merambat dengan orde harian sampai beberapa minggu (Andrew, 1987).

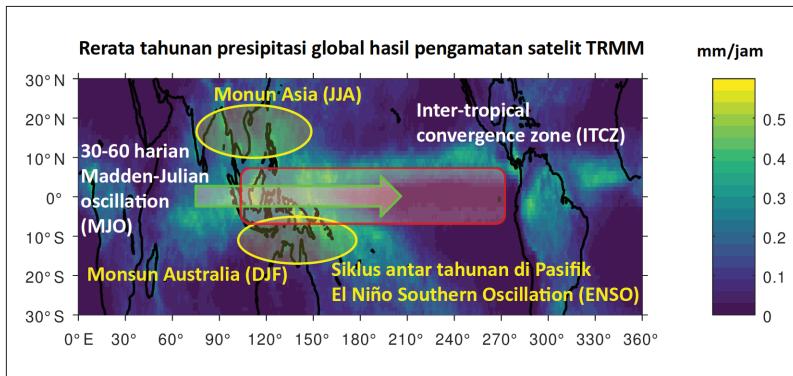
Siklus antarmusim yang dikenal sebagai Madden-Julian Oscillation (MJO) merambat dengan orde 30–60 harian (Gambar 9.1). Inisiasi MJO berasal dari Samudra Hindia bagian barat kemudian berpropagasi ke timur dan berasosiasi dengan pertumbuhan awan hujan melintasi BMI hingga sampai Samudra Pasifik (Zhang, 2005). Siklus dengan skala waktu tahunan adalah monsun. Monsun merupakan variabilitas musim dalam arah utara-selatan yang mendominasi iklim di BMI. Ada dua tipe monsun yang melintasi BMI. Monsun Asia aktif di bulan Juni-Juli-Agustus (JJA) ketika posisi semu matahari berada di utara. Belahan bumi utara menerima panas lebih yang menguapkan

air laut sebagai sumber untuk pembentukan awan dengan konsentrasi pertumbuhan awan dan presipitasi berada di sekitar daratan Asia dan sepanjang Pasifik bagian utara. Ketika matahari berpindah ke posisi semunya di selatan pada bulan Desember-Januari-Februari (DJF), Monsun Australia menjadi aktif. Sebaran pertumbuhan awan berada di wilayah BMI bagian selatan, daratan Australia serta Pasifik bagian selatan. Konvergensi uap air yang berkaitan dengan posisi semu matahari saat di utara (JJA) dan selatan (DJF) dan pertumbuhan awan disebut Inter Tropical Convergence Zone (ITCZ) (Holton, 2004).

Dinamika atmosfer tropis dengan periode antar tahunan disebut sebagai El Niño Southern Oscillation (ENSO). ENSO berkaitan dengan kenaikan suhu permukaan laut di Pasifik bagian barat dan perbedaan tekanan permukaan di Darwin (Australia) dan Tahiti. Fenomena ENSO dapat mengganggu variabilitas musiman (Lutgen et al., 2013).

Berbagai macam siklus dinamika atmosfer dari segi skala waktu dan fenomena yang mengganggu variabilitas musim dapat memengaruhi kondisi curah hujan yang berkaitan dengan pertanian. Dengan demikian, secara tidak langsung siklus dinamika atmosfer wilayah tropis BMI memiliki peranan penting dalam program pertanian untuk ketahanan pangan. Pengetahuan dan pemahaman dinamika atmosfer dapat memberi kontribusi pada peningkatan sistem prediksi iklim dan kinerja model.

Dinamika atmosfer di BMI berkaitan erat dengan variabilitas parameter utama cuaca dan iklim, yakni temperatur, kelembapan, tekanan udara, kecepatan dan arah angin. Temperatur adalah variabel utama karena merepresentasikan radiasi termal fluida atmosfer. Kelembapan merupakan variabel utama kedua karena berkaitan dengan kandungan uap air di atmosfer akibat proses penguapan air laut oleh matahari. Variabel kelembapan berkaitan dengan parameter curah hujan (Lutegen et al., 2013). Kelembapan atmosfer tinggi dapat memicu proses kondensasi untuk membentuk awan hujan. Pengetahuan tentang variabilitas kelembapan di atmosfer berdasarkan data observasi merupakan salah satu hal penting untuk memahami



Sumber: Dimodifikasi dari Tesis Noersomadi (2019)

Gambar 9.1 Rerata Tahunan Presipitasi Global Hasil Pengamatan Satelit Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

karakteristik dinamika atmosfer. Data hasil pengukuran langsung parameter cuaca dan iklim (terutama temperatur dan kelembapan) adalah kunci untuk mengetahui proses fisis di atmosfer.

Kelembapan atmosfer menunjukkan kondisi uap air yang ada di atmosfer. Uap air memainkan peran dominan dalam keseimbangan radiasi dan siklus hidrologi. Ini adalah elemen utama dalam termodinamika atmosfer, sebagai pengangkut panas latent, berkontribusi terhadap penyerapan dan emisi radiasi, dan mengembun menjadi awan yang memantulkan dan menyerap radiasi matahari. Dengan demikian, uap air secara langsung memengaruhi keseimbangan energi. Di atmosfer bagian bawah, konsentrasi uap air dapat bervariasi berdasarkan besarnya dari satu tempat ke tempat lain. Variabilitas ini menimbulkan masalah mendasar dalam pemodelan iklim karena tingginya resolusi temporal dan spasial yang diperlukan untuk menyelesaikan semua proses yang menciptakan gradien tajam yang terkait dengan variabilitas. Kontribusi uap air terhadap fenomena atmosfer pada skala waktu dan ruang yang berbeda untuk iklim saat ini dan masa depan sehingga pemantauan uap air menjadi penting. Hal ini merupakan prasyarat untuk validasi model dan membantu dalam memahami perilaku atmosfer. Profil uap air menjadi parameter

penting yang menentukan stabilitas atmosfer dalam proses pemodelan iklim.

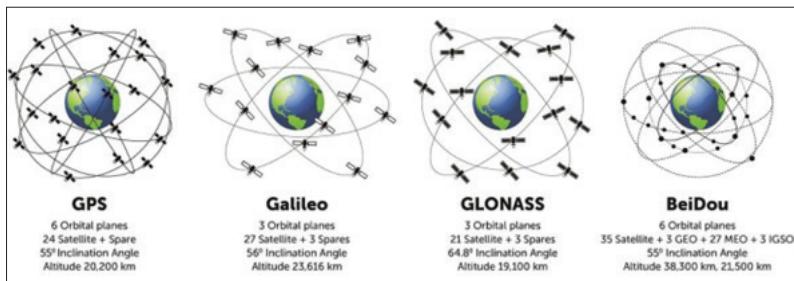
Pengukuran parameter iklim bermula di permukaan menggunakan sensor yang dipasang di ketinggian 2 m. Dalam beberapa kasus, sensor dipasang di ketinggian 10 m di atas permukaan tanah. Observasi atmosfer di permukaan tidak cukup untuk memahami dinamika atmosfer secara komprehensif karena hanya mengukur di satu lapisan (permukaan di atas bumi). Oleh karena itu, teknologi pengamatan atmosfer terus berkembang hingga dapat mengamati profil atmosfer secara vertikal. Balon radiosonde merupakan teknologi pengamatan vertikal atmosfer dari permukaan. Radiosonde mengukur temperatur, kelembapan, dan tekanan udara. Adapun data profil kecepatan dan arah angin diturunkan dari rekaman data lokasi sensor *global positioning system* (GPS) yang dibawa balon dengan asumsi bahwa balon bergerak acak terbawa oleh angin.

Di samping teknologi observasi atmosfer terestrial di permukaan dan menggunakan dengan balon radiosonde, terdapat pula teknologi pengamatan atmosfer berbasis satelit. Bab ini fokus membahas hasil pengukuran atmosfer dengan satelit yang menggunakan teknologi satelit navigasi, *global navigation satellite system* (GNSS), dan satelit orbit rendah. Teknik pengukuran vertikal atmosfer ini disebut *radio occultation* (RO). Penggunaan istilah umum GNSS dewasa ini adalah untuk mengganti istilah GPS sebagai satelit navigasi pertama yang mengukur waktu akurat dan posisi objek tertentu.

B. GNSS-RO

Global navigation satellite systems (GNSS) adalah sistem yang menggunakan satelit untuk memberikan informasi lokasi dan waktu kepada pengguna di seluruh dunia. Salah satu sistem GNSS yang paling terkenal adalah *global positioning system* (GPS), yang dioperasikan oleh pemerintah Amerika Serikat. Namun, ada sistem GNSS lain yang beroperasi, seperti sistem GLONASS Rusia dan sistem Galileo Uni Eropa (Gambar 9.2). GNSS menjadi makin penting untuk berbagai aplikasi, mulai dari navigasi GPS di ponsel pintar hingga pertanian

presisi dan mobil tanpa pengemudi. GNSS beredar di ketinggian Orbit Bumi Menengah (~20.000 km) dan memancarkan sinyal radio pada frekuensi 1.57542 GHz dan 1.2276 GHz dengan panjang gelombang sekitar 20 cm. Untuk keperluan navigasi, waktu yang dibutuhkan untuk menerima sinyal dari beberapa satelit, digunakan untuk menghitung posisi penerima.



Sumber: Lonitz (2023)

Gambar 9.2 Empat Konstelasi GNSS

Adapun *radio occultation* (RO) atau akultasi radio adalah teknik pengindraan jauh yang digunakan untuk mengukur sifat fisik atmosfer planet. Operator satelit yang ada di dalam okultasi Radio GNSS termasuk CHAMP (satelit), GRACE dan GRACE-FO, MetOp dan COSMIC-2 yang baru saja diluncurkan (Ding, et al., 2022).

Sejarah pengamatan bumi dengan GPS-RO, untuk selanjutnya ditulis GNSS-RO, yang pertama kali adalah misi GPS Meteorology/ GPS-Met pada tahun 1994 (Sokolovskiy et al., 2001). GPS-Met berhasil mengamati profil temperatur yang akurat dibandingkan pengamatan dari permukaan bumi menggunakan balon radiosonde. Setelah misi GPS-Met, pada tahun 2001 Geo Forcung Zentrum Germany meluncurkan satelit Challenging Mini-satellite Payload (CHAMP) (Wickert et al., 2001; Reightber et aal., 2003; Rother et al., 2019). CHAMP adalah mini satelit multifungsi milik Jerman di ketinggian rendah dengan presisi yang tinggi, yang dikendalikan GSOC dari stasiun bumi di Weilheim. CHAMP dapat digunakan untuk riset-riset

geosains dan atmosfer karena memiliki kelengkapan instrumen, seperti magnetosfer, akselerometer, sensor bintang, penerima GPS, reflektor retro laser, dan pengukur penyimpangan ion. Kombinasi dengan antena okultasi beresolusi tinggi, memungkinkan *atmospheric sounding* jauh hingga ke troposfer bawah (Wickert, et al., 2003), dan membantu melengkapi sistem pengukuran di permukaan untuk pemantauan dan pengembangan model-model iklim dan atmosfer. COSMIC telah menyediakan 1500–2000 suara per hari secara global, memberikan kontribusi signifikan terhadap prediksi cuaca numerik dan studi meteorologi (Anthes et al., 2008).

MetOp-A/B/C adalah tiga satelit meteorologi yang mengorbit kutub yang membentuk komponen segmen ruang angkasa dari keseluruhan Sistem Kutub EUMETSAT (EPS). MetOp-A diluncurkan pada tahun 2006 dan data RO-nya terbukti berkontribusi terhadap prakiraan cuaca hingga 10 hari ke depan. Misi ini diikuti oleh MetOp-B dan C. Sejak Maret 2019, ECMWF mulai mengasimilasi sudut teku dari MetOp-C, dengan kualitas yang serupa dengan pengukuran MetOp-A dan B. Saat ini, konstelasi MetOp dapat menghasilkan sekitar 2000 suara per hari. Sebagai langkah selanjutnya, grup EUMETSAT berencana meluncurkan enam satelit MetOp generasi kedua (MetOp-SG).

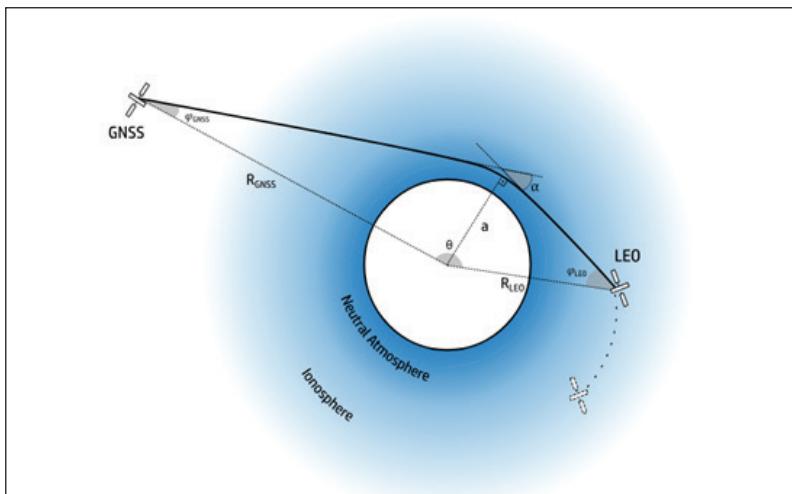
Pada April 2006, National Space Organization (NSPO) Taiwan bekerja sama dengan University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) USA berhasil merilis misi yang khusus didedikasikan untuk pengamatan atmosfer, yakni Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate (COSMIC) (Anthes, 2011). COSMIC bergabung dengan konstelasi satelit US-Taiwan dengan misi untuk menghasilkan data ‘pengukuran *near-real-time* okultasi radio’ (GPS-RO) yang dapat dimanfaatkan untuk prakiraan cuaca, pemantauan iklim, serta riset-riset atmosfer, ionosfer, dan geodetik. Data-data yang dihasilkan COSMIC juga telah berhasil diaplikasikan untuk memprediksi karakteristik badai serta pemantauan perubahan iklim dengan akurasi yang cukup baik (Anthes et al., 2008). Namun, COSMIC hanya dapat mencapai masa penggunaannya sampai 2011, yang kemudian dilanjutkan oleh COSMIC-2.

COSMIC-2 yang berhasil diluncurkan atas kerja sama National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dan UCAR pada Juni 2019. COSMIC-2 adalah misi RO yang fokus untuk pengamatan wilayah ekuator (Schreiner et al., 2020). COSMIC-2 banyak berkontribusi pada sistem konstelasi yang ada yang terdiri dari 12 satelit. Misi payload COSMIC-2 menjadi penerima sinyal TriG GNSS-RO yang menerima lebih banyak data dengan menambahkan sistem GALILEO Eropa dan kemampuan pelacakan *global navigation satellite system* (GLONAS). COSMIC-2 telah menghasilkan sekitar 5000 *soundings* (pancaran) per hari di wilayah tropis, 35°LU – 35°LS , terutama untuk prakiraan siklon tropis (Ho et al., 2020). Sistem ini dapat memberikan densitas data yang jauh lebih tinggi, baik secara spasial maupun temporal. Implikasinya adalah dukungan untuk riset-riset dan pemantauan menjadi lebih baik.

Baik CHAMP maupun COSMIC, didasari oleh teknik oportunistik yang melekat pada GNSS-RO, dengan ide utamanya adalah menerima sinyal GNSS di orbit rendah Bumi (LEO) setelah merambat melalui atmosfer Bumi. Dari sudut pandang satelit GNSS, peristiwa okultasi dapat digambarkan saat penerima naik atau turun dari Bumi. Meskipun penerima tidak sepenuhnya dibayangi, atmosfer akan bertindak sebagai lensa sinyal. Saat sinar melewati bagian atmosfer, kecepatan sinyal GNSS diubah karena indeks biasnya tidak satu, dan jalurnya bengkok karena gradien indeks bias.

Aspek fundamental dari teknik ini bergantung pada asumsi optik geometris, yaitu mempertimbangkan sinyal (gelombang elektromagnetik) sebagai kumpulan sinar, dan asumsi atmosfer simetris bola di mana sinar tersebut membelok (Wu et al., 2022). Gambar 9.3 menggambarkan geometri suatu okultasi, yang diamati dari samping. Pandangan ini biasa disebut dengan bidang okultasi. Sudut belokan (*bending angle*) dan parameter tumbukan (*impact parameter*) masing-masing dinotasikan sebagai α dan a . Panjang vektor yang menggambarkan posisi satelit GNSS dan LEO masing-masing adalah R_{GNSS} dan R_{LEO} , dan sudut antara keduanya disebut sebagai sudut pisah, θ . Sudut antara sinar sinyal dan vektor GNSS dan LEO masing-masing

dinotasikan sebagai φ_{GNSS} dan φ_{LEO} . Dengan demikian, sinyal yang diterima digunakan untuk mengukur *bending angle* berkas sinyal, yang pada gilirannya dapat dibalik secara analitis menjadi informasi yang menggambarkan sifat bias dari penampang vertikal atmosfer.

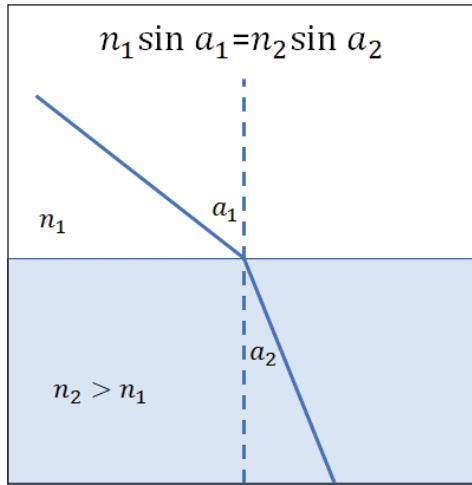


Sumber: Sievert (2019)

Gambar 9.3 Skema Geometri pada RO

GNSS-RO memanfaatkan jeda waktu tiba gelombang radio yang melintasi lapisan atmosfer. Jeda waktu tiba gelombang radio di satelit penerima *low earth orbit* (LEO) adalah data input untuk menghitung sudut belokan a (*bending angle*). Sudut a di setiap lapisan atmosfer antara 0,1–1 km diturunkan dengan asumsi bahwa atmosfer menyerupai irisan bawang yang berlapis-lapis. Sudut a memiliki hubungan dengan nilai indeks bias lapisan ke- n di atmosfer menurut hukum Snellius, $n_1 \sin a_1 = n_2 \sin a_2$ (Gambar 8.4). Selanjutnya, profil tekanan udara p , temperatur T , dan kelembapan q diperoleh dengan mengetahui bahwa indeks bias merupakan fungsi ketiga variabel tersebut.

Indeks bias (n) itu sendiri merupakan perbandingan kecepatan gelombang elektromagnetik dalam ruang hampa (c) dengan kecepatan melalui medium (v), yaitu $n = c/v$.



Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.4 Dasar Fisis GNSS-RO Berdasarkan Hukum Snellius

Pembiasan merupakan fungsi dari kerapatan elektron di ionosfer, suhu, tekanan, dan uap air di atmosfer. Sudut belok sinyal dianggap sebagai parameter utama dalam sistem asimilasi yang digunakan untuk penelitian operasional atmosfer. Pemrosesan lebih lanjut dari indeks bias memberikan informasi berharga mengenai profil suhu, uap air dan tekanan di atmosfer netral, serta kerapatan elektron di ionosfer. Oleh karena itu, teknik GNSS RO memberikan informasi berguna tentang struktur ionosfer, stratosfer, dan troposfer (Steiner et al., 2004) dan dapat mengatasi banyak keterbatasan sistem yang ada. Teknik ini memiliki sejumlah keunggulan antara lain potensi cakupan global, resolusi vertikal tinggi, akurasi tinggi, kemampuan segala cuaca dan bebas kalibrasi. Karena keunggulan unik ini, teknologi ini telah membuka peluang baru untuk berbagai aplikasi terkait meteorologi dan iklim serta untuk pemahaman yang lebih baik tentang atmosfer bumi. Misalnya, data GNSS RO dapat digunakan untuk (Anthes et al., 2000; Kirchengast 1999):

- 1) meningkatkan akurasi ramalan cuaca numerik dan studi sistem iklim;
- 2) memberikan ketinggian geopotensial yang akurat;
- 3) mengungkap tinggi dan bentuk tropopause dalam skala global (sebuah tujuan penting dalam penelitian atmosfer dan iklim);
- 4) menentukan distribusi global energi gelombang gravitasi dari troposfer atas hingga stratosfer;
- 5) menyelidiki peristiwa El Niño;
- 6) menyelidiki distribusi uap air global dan memetakan aliran uap air di atmosfer;
- 7) meningkatkan bidang tekanan permukaan global;
- 8) mempelajari ketidakteraturan kerapatan elektron di ionosfer; dan
- 9) *GNSS-RO bending* di atmosfer lembap.

Bab ini fokus mendiskusikan profil q (kelembapan) dengan satuan gram per kilogram (g/kg) hasil pengamatan GNSS-RO COSMIC-2. Profil q merupakan data input untuk menghitung total kandungan uap air di atmosfer. Data kandungan uap air di atmosfer sangat penting untuk mendukung pengembangan model prediksi numerik dan analisis distribusi awan hujan. Akan tetapi, permasalahan muncul dalam hal ketidakmampuan teknik GNSS-RO untuk mengamati atmosfer dekat permukaan. Penetrasi kejadian okultasi di dekat permukaan gagal mengukur sudut belokan secara akurat sehingga meninggalkan data kosong pada setiap profil q , terutama di bawah ketinggian atmosfer (z) 2 km.

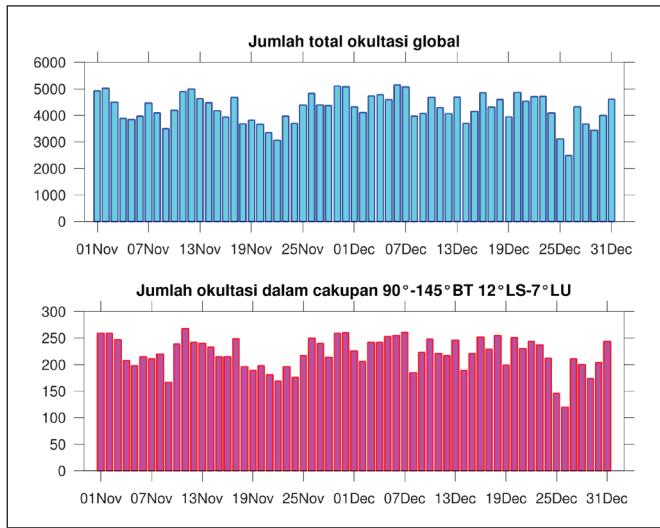
Bahasan dalam bab ini lebih menekankan pada contoh bagaimana mengembangkan model ekstrapolasi untuk estimasi data profil q hingga permukaan bumi ($z = 0$ km). Hasil model ekstrapolasi dijadikan sebagai ekstensi profil q untuk mengisi data kosong sehingga diperoleh profil q sampai permukaan. Profil q yang sudah lengkap digunakan untuk menghitung total kandungan uap air. Definisi total kandungan uap air adalah hasil integrasi profil q terhadap perubahan tekanan udara dibagi dengan percepatan gravitasi. Penjelasan rinci mengenai total kandungan uap air akan diuraikan di bagian akhir bab ini.

C. COSMIC-2

Satelit COSMIC-2 mengorbit pada sudut inklinasi 28° . Orbit inklinasi rendah dekat ekuator menghasilkan okultasi lebih banyak di sekitar tropis. Schreiner et al. (2020) melaporkan bahwa jumlah okultasi dari 6 satelit LEO misi COSMIC-2 mencapai ~4.000 profil atmosfer dalam satu hari. Gambar 9.5 (atas) menunjukkan jumlah okultasi global dari 1 November–31 Desember 2020. Secara rata-rata jumlah profil atmosfer hasil COSMIC-2 mencapai ~4.000 sepanjang batasan waktu kajian dalam bab ini. Kemudian penulis membatasi wilayah kajian yang berfokus pada Benua Maritim Indonesia (BMI) 90° – 145° BT dan 12° LS– 7° LU. Terlihat bahwa jumlah data atmosfer hasil rekaman COSMIC-2 di BMI kurang lebih 200 profil (Gambar 9.5 [bawah]). Ketersediaan data profil atmosfer hasil pengamatan COSMIC-2 membuka peluang untuk riset variabilitas atmosfer 4-dimensi, di mana tiap variabel merupakan fungsi ruang bujur, lintang, serta ketinggian dan fungsi waktu.

Untuk lebih memperjelas sebaran data okultasi COSMIC-2, penulis mengambil sampel hasil pengamatan pada tanggal 11 November 2020 (Gambar 9.6). Pada waktu tersebut terdapat kejadian okultasi mencapai 250 profil atmosfer tersebar merata di BMI (lingkaran ungu). Kotak kuning pada Gambar 9.6 adalah lokasi pengamatan radiosonde yang secara rutin 2 kali peluncuran dalam 1 hari pada jam 00 dan 12 UTC. Lokasi radiosonde di BMI, yakni di Medan, Padang, Bengkulu, Jakarta, Cilacap, Surabaya, Pontianak, Pangkalan Bun, dan Makassar dikelola oleh Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia. Selain itu, terdapat lokasi rutin di Changi Airport, Singapura, dan Kuching, Malaysia (NOAA, NCEI¹). Dari Gambar 9.6 ini kita dapat melihat bahwa lokasi pengamatan vertikal atmosfer dari permukaan terbatas di wilayah Indonesia daratan bagian barat dan beberapa di wilayah tengah di antara 95° – 120° BT. Tidak ada data pengamatan vertikal di wilayah BMI bagian lautan ataupun bagian timur dari peluncuran radiosonde. Oleh karena itu, data GNSS-RO

¹ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dan National Centers for Environmental Information (NCEI) - Amerika Serikat.

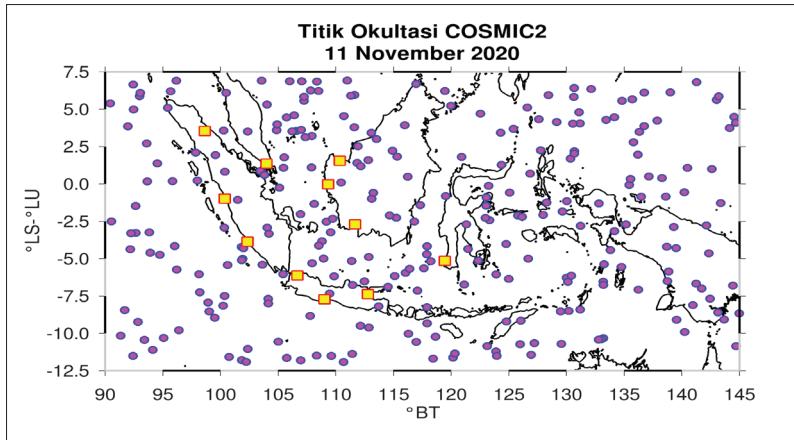


Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.5 Jumlah total okultasi global (atas) dan dalam cakupan wilayah Benua Maritim Indonesia (bawah) dari pengamatan satelit COSMIC-2.

terutama hasil pengamatan COSMIC-2 ini sangat bermanfaat untuk melengkapi kekosongan pengamatan vertikal di area yang tidak terdapat peluncuran radiosonde.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

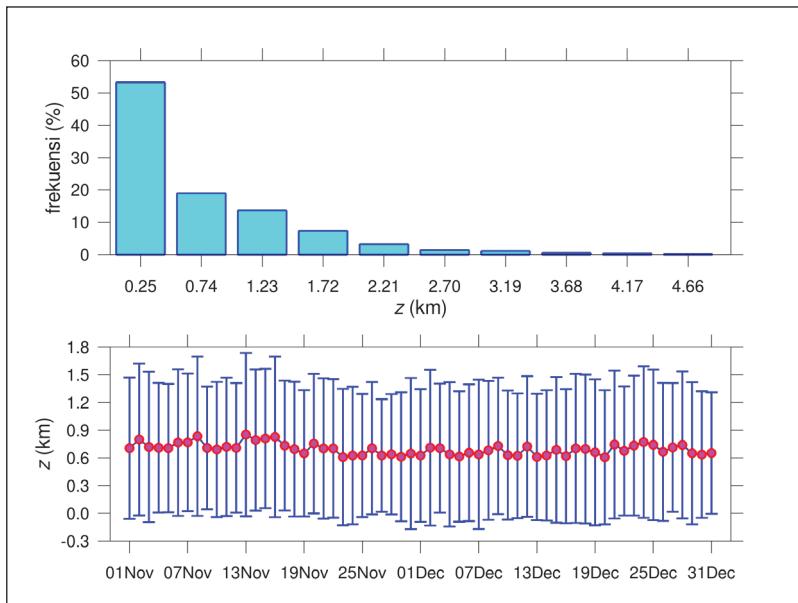


Keterangan: detail ada di dalam teks

Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.6 Lokasi Kejadian Okultasi (Lingkaran Ungu) dan Titik Peluncuran Radiosonde (Kotak Kuning)

Sekarang kita fokus pada statistik penetrasi kejadian okultasi GNSS-RO COSMIC-2 sebelum masuk pada penjelasan model eks-trapolasi. Gambar 9.7 (atas) menunjukkan diagram batang capaian penetrasi dari tiap kejadian okultasi. Lebih dari ~53% okultasi COS-MIC-2 mencapai 0,3 km di atas permukaan bumi. Sebanyak 18%, 15%, dan 8% berurut-urut okultasi mencapai 0,8 km; 1,3 km; dan 1,8 km yang berarti bahwa total lebih dari 40% profil atmosfer hasil pengamatan GNSS-RO tidak lengkap mencapai permukaan bumi. Secara rata-rata capaian okultasi mencapai 0,8 km di atas permukaan bumi. Grafik pada Gambar 9.7 (bawah) memperlihatkan bahwa dalam beberapa kasus waktu pengamatan terdapat standar deviasi lebih besar dari reratanya. Hasil statistik yang menunjukkan standar deviasi lebih besar dari reratanya memberi arti bahwa capaian penetrasi kejadian okultasi sangat beragam. Secara keseluruhan, Gambar 9.7 menginfor-masikan bahwa terdapat kekosongan data di dekat permukaan untuk tiap profil atmosfer, dalam riset ini variabel q . Untuk melengkapi (mengisi data kosong) profil q hingga mencapai permukaan, riset ini mengembangkan model ekstrapolasi linier kuadratik.



Keterangan: Rerata dan standar deviasi capaian ketinggian okultasi dari semua profil di BMI

Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.7 Diagram Batang Distribusi Capaian Penetrasi Kejadian Okultasi di pada Tiap Interval Ketinggian di Atas Permukaan Bumi (Atas)

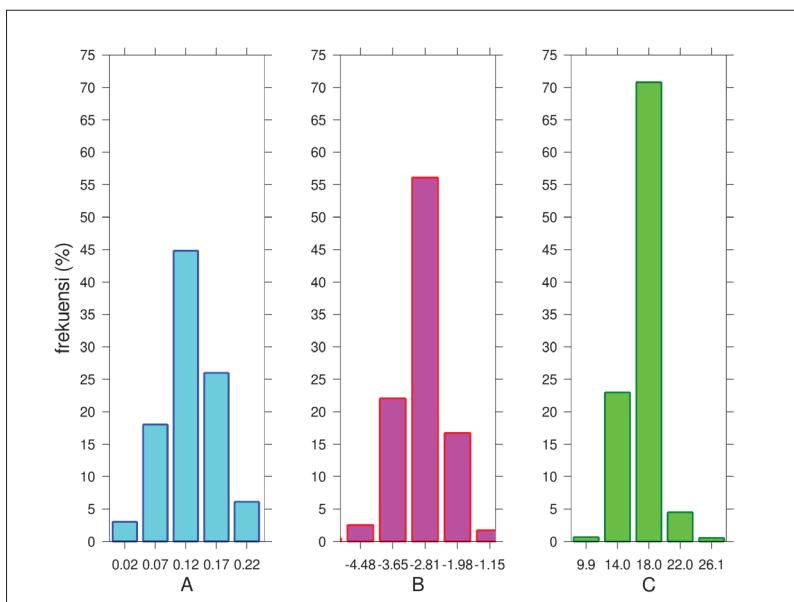
D. Model Ekstrapolasi Linier Kuadratik

Riset ini mengembangkan model ekstrapolasi linier kuadratik (Wilks, 2005). Persamaan 9.1 adalah model kuadratik sederhana yang me-gandung koefisien A dan B masing-masing untuk variabel kuadrat dan linier, serta konstanta C yang belum diketahui.

$$Q_{mod}(z) = Az^2 + Bz + C \quad (9.1)$$

Penulis menerapkan pendekatan penapisan polinom orde-2 untuk mencari A, B, dan C dari setiap data profil q_{mod} sebagai fungsi ketinggian z. Penambahan subskrip *mod* pada variabel *q* bertujuan untuk mendefinisikan variabel kelembapan hasil model. Gambar

9.8 adalah distribusi frekuensi tiap koefisien. Dengan menggunakan semua sampel profil q sepanjang batas waktu pengamatan (1 November–31 Desember 2020), nilai rerata dan standar deviasi dari tiap koefisien berurut-urut adalah $0,13 \pm 0,05$, $-2,90 \pm 0,66$, dan $17,12 \pm 2,25$. Frekuensi rerata koefisien A mencapai 45%, rerata koefisien B hingga 55%, dan koefisien C menunjukkan 70%. Berdasarkan hasil pada Gambar 9.8 ini maka model persamaan linier kuadratik dipilih dengan mengambil nilai rerata tiap koefisien. Ini berarti bahwa q_{mod} pada $z = 0$ km bernilai 17,12 g/kg.

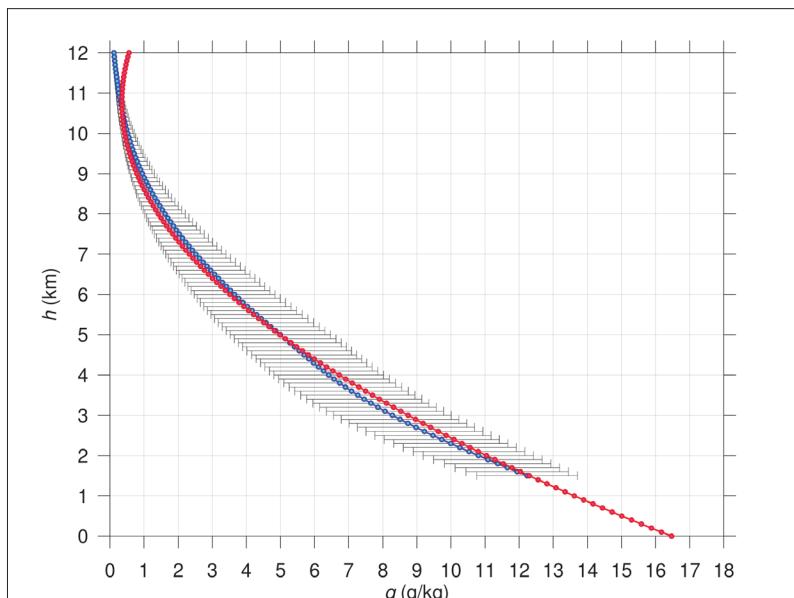


Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.8 Distribusi Frekuensi Koefisien A, B, dan C untuk Model Ekstrapolasi Linier Kuadratik

Gambar 9.9 menunjukkan rerata dan standar deviasi profil q_{obs} dari seluruh sampel data COSMIC-2 di wilayah BMI hingga 1,5 km di atas permukaan. Pembatasan data yang ditampilkan hingga 1,5 km adalah karena jumlah sampel di bawah 1,5 km lebih sedikit

dibandingkan jumlah sampel di atasnya. Dengan demikian, data hasil pengamatan yang ditampilkan di Gambar 9.9 dapat dipercaya secara statistik. Nilai rerata observasi profil q_{obs} bernilai kurang dari 1 g/kg di ketinggian 10 km dan makin mendekati 0 g/kg di ketinggian 12 km. Standar deviasi di antara 10–12 km sangat kecil yang berarti bahwa variasi q_{obs} di interval ketinggian ini sangat rendah atau kondisi udara sangat kering. Standar deviasi berangsur meningkat di bawah 10 km seiring mendekati permukaan bumi. Lapisan atmosfer di wilayah BMI memiliki kelembapan tinggi sebesar 5 g/kg pada ketinggian 5 km. Pada ketinggian rerata lapisan batas atmosfer antara atmosfer bebas dan lapisan permukaan ($z = 12$ km) tercatat rerata q_{obs} sebesar 11 g/kg. Secara garis besar, kurva rerata data profil q_{obs} memiliki pola, seperti kurva fungsi kuadratik.

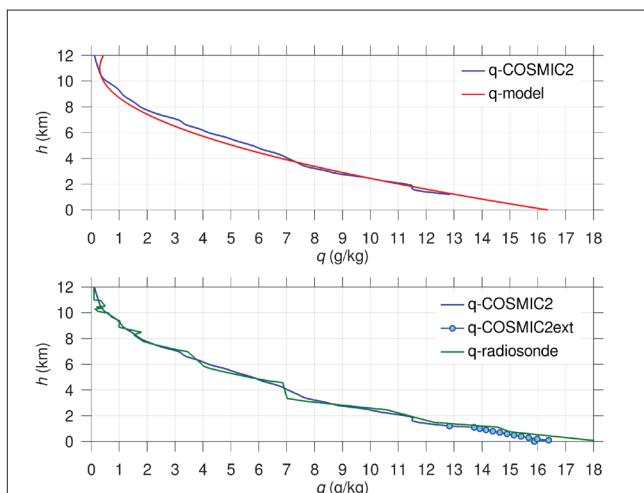


Keterangan: Model q dengan menerapkan nilai rerata koefisien A, B, dan C pada persamaan 9.1 (garis dan lingkaran merah).

Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.9 Rerata (Garis dan Lingkaran Biru) dan Standar Deviasi (Garis Horizontal Abu-abu) Data Observasi Profil q

Garis merah pada Gambar 9.9 menunjukkan grafik hasil model ekstrapolasi linier kuadratik. Fungsi persamaan kuadrat memiliki titik balik atau puncak kurva sebagai nilai minimum atau maksimum. Model fungsi $q_{mod}(z)$ tidak memiliki titik potong terhadap sumbu- z karena nilai rerata koefisien A, B, dan C memberikan nilai diskriminan negatif (-0,53). Nilai minimum model fungsi $q_{mod}(z)$ adalah sebesar 0,35 g/kg di ketinggian $z = 10,8$ km. Hasil model >11 km menunjukkan bias terhadap rerata data observasi. Kita dapat mengabaikan bias tersebut karena fokus riset ini adalah memperoleh model penapisan yang akurat terutama di ketinggian dekat permukaan. Model fungsi $q_{mod}(z)$ terlihat berhimpit terhadap profil rerata q_{obs} dengan sedikit lebih kecil pada rentang 5–10 km dan lebih besar pada 3–5 km. Secara keseluruhan, model fungsi $q_{mod}(z)$ menunjukkan kesesuaian dengan pola rerata data COSMIC-2. Hasil rerata data observasi dan model menampilkan tren linier di dekat permukaan (<2 km). Oleh karena itu, nilai model fungsi kuadratik ini dapat bermanfaat untuk mengisi kekosongan data profil q_{obs} hingga $z = 0$ km.



Keterangan: Profil radiosonde, COSMIC-2, dan model yang ditambahkan dengan standar deviasi data pengamatan radiosonde.

Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.10 Profil COSMIC-2 pada Tanggal 13 Desember 2020 dan Model (Atas)

Langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian model ekstrapolasi linier kuadratik untuk meminimalisasi bias antara hasil model dengan data q nyata, yaitu data q_{rs} di dekat permukaan hasil pengamatan radiosonde (subskrip rs berarti q hasil radiosonde). Pengamatan dengan balon radiosonde mengukur profil atmosfer dari permukaan bumi. Data q hasil radiosonde dapat dianggap sebagai acuan untuk pengujian dan pembandingan dengan hasil model, terutama di ketinggian < 2 km. Perhitungan yang disampaikan dalam bab ini menggunakan data pengamatan radiosonde di Singapura pada interval 1 November–31 Desember 2020. Nilai standar deviasi q_{rs} ($\sigma_{q_{rs}}$) dihitung berdasarkan seluruh sampel pengamatan radiosonde. Nilai $\sigma_{q_{rs}}$ akan dijadikan input untuk menambahkan fluktuasi pada profil q_{mod} hasil penapisan tiap q_{obs} .

Penjelasan singkat penerapan model linier ekstrapolasi untuk mengisi data kosong pada profil q_{obs} di dekat permukaan adalah sebagai berikut. Gambar 9.10 (atas) memerlihatkan contoh kasus profil individu data q_{obs} (q -COSMIC-2) beserta model penapisan q_{mod} . Penetrasi COSMIC-2 hanya mencapai 1,5 km di atas permukaan bumi yang berarti bahwa terdapat data kosong q_{obs} di bawah 1,5 km. Profil $q_{mod}(z)$ terlihat berhimpit dengan profil q_{obs} . Jika pada rentang ketinggian di mana profil q_{obs} tidak ada data (di bawah 1,5 km), hanya diisi dengan $q_{mod}(z)$ maka tidak ada fluktuasi profil q yang mendekati nilai nyata. Oleh karena itu, perlu dilakukan penambahan data $\sigma_{q_{rs}}$ terhadap profil q_{mod} . Gambar 9.10 (bawah) mendeskripsikan pembandingan data observasi COSMIC-2 (q -COSMIC-2) dan data radiosonde pada tanggal 13 Desember 2020. Profil q -COSMIC-2ext adalah ekstensi data observasi berdasarkan hasil model ekstrapolasi linier kuadratik q_{mod} setelah ditambahkan $\sigma_{q_{rs}}$. Profil q -COSMICext terlihat sesuai dengan profil q_{rs} . Dengan demikian, data lengkap profil q_{obs} siap digunakan untuk estimasi total kandungan uap air.

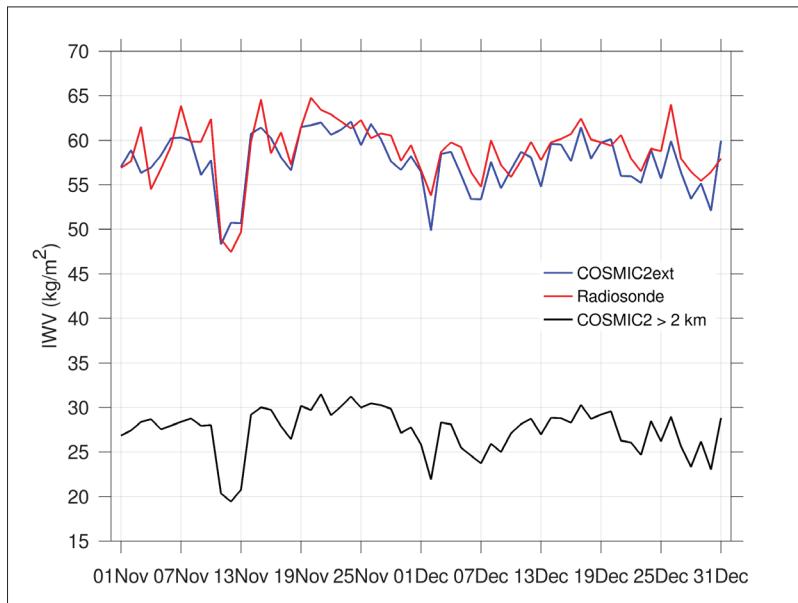
E. Estimasi Total Kandungan Uap Air

Total kandungan uap air (*integrated water vapor*; IWV) merupakan hasil integrasi kelembapan $q(z)$ terhadap perubahan tekanan udara

$p(z)$ dibagi dengan percepatan gravitasi g (9,8 m/S⁻²). Persamaan 9.2 menggambarkan formulasi IWV yang bergantung pada nilai q .

$$IWV = \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} q dp \quad (9.2)$$

Variabel $q(z)$ adalah besaran nondimensional dengan satuan g/kg atau kg/kg, adapun satuan profil $p(z)$ dalam hekto-Pascal (hPa). Berbeda dengan kelembapan, variasi tekanan udara terhadap waktu di atmosfer relatif kecil. Data kosong profil $p(z)$ di bawah ~1,5 km hasil observasi COSMIC-2 dapat diisi dengan data tekanan hasil dari persamaan hidrostatik $p(z) = -\rho g z$, dengan ρ adalah densitas udara di permukaan sebesar 1,22 kg/m³. Persamaan hidrostatik tersebut menggunakan nilai tekanan udara standar di permukaan $p(z=0)$ sebesar 1013 hPa (Holton, 2004).



Sumber: Noersomadi (2024)

Gambar 9.11 Deret waktu IWV radiosonde, IWV COSMIC-2 > 2km dan total IWV COSMIC-2ext.

Analisis dimensi variabel menunjukkan bahwa satuan IWV dalam kilogram per meter kuadrat (kg/m^2). Nilai $1 \text{ kg}/\text{m}^2$ artinya setara dengan 1 kg uap air berada di atas luas permukaan 1 m^2 . Satuan kg/m^2 bersesuaian dengan 1 mm dalam meteorologi. Definisi 1 mm adalah air seberat 1 kg di atas permukaan 1 m^2 akan mencapai ketinggian 1 mm . Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa satuan $1 \text{ kg}/\text{m}^2$ setara dengan densitas air dalam volume 10^{-3} m^3 .

Perhitungan yang disajikan dalam bab ini lebih mengarah pada cara menghitung integrasi uap air dalam dua tahap untuk menguji tingkat signifikan penerapan model ekstrapolasi linier kuadratik pada profil q . Tahap kesatu adalah menghitung integral dari p_1 pada $z = 2 \text{ km}$ hingga p_2 ($z = 20 \text{ km}$). Tahap kedua dengan menghitung total IWV dengan batas integral dari p_1 ($z=0 \text{ km}$) hingga p_2 ($z = 20 \text{ km}$). Hasil integrasi sampel individu q -COSMIC-2 pada Gambar 9.9 menunjukkan nilai IWV $> 2 \text{ km}$ sebesar $26,97 \text{ kg}/\text{m}^2$. Total IWV data profil q_{rs} dan q -COSMIC-2ext berurut-urut sebesar $57,78 \text{ kg}/\text{m}^2$ dan $54,79 \text{ kg}/\text{m}^2$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan model ekstrapolasi memberikan dampak pada estimasi total IWV yang mendekati pengamatan radiosonde. Pada contoh kasus individu ini, terlihat bahwa IWV $> 2 \text{ km}$ hanya berkisar $\sim 0,5$ dari total IWV.

Analisis selanjutnya adalah melakukan pembandingan IWV hasil GNSSRO terhadap observasi radiosonde sepanjang studi kasus 1 November–31 Desember 2020. Profil COSMIC-2 dipilih dengan kriteria jarak okultasi $\leq 3^\circ$ dan waktu kejadian $\leq 3 \text{ jam}$ dari lokasi dan waktu peluncuran balon. Apabila terdapat profil lebih dari satu dalam radius $\leq 3^\circ$ atau waktu okultasi $\leq 3 \text{ jam}$ maka dipilih yang paling dekat dan paling pendek beda waktu pengamatannya. Langkah yang sama dilakukan mulai dari penerapan model ekstrapolasi untuk mengisi data kosong pada tiap profil q_{obs} sampai dengan integrasi 2 tahap (integrasi dari ketinggian 2 km dan integrasi total).

Gambar 9.11 menunjukkan hasil total IWV hasil pengamatan radiosonde dan estimasi IWV dari GNSSRO dengan 2 proses integrasi. Label IWV COSMIC-2 $> 2 \text{ km}$ adalah untuk integrasi profil q_{obs} dari ketinggian 2 km. IWV COSMIC-2ext merepresentasikan hasil integral

total untuk q_{obs} yang telah diekstrapolasi. Statistik rerata \pm standar deviasi data IWV COSMIC-2 > 2 km, IWV COSMIC-2ext dan IWV radiosonde berurut-urut adalah $27,41 \pm 2,63$ kg/m², $57,60 \pm 3,15$ kg/m², $58,82 \pm 3,41$ kg/m². Korelasi linier deret waktu IWV COSMIC-2 > 2 km terhadap IWV radiosonde dan IWV COSMIC-2ext terhadap IWV radiosonde sama-sama menunjukkan nilai 0,8. Akan tetapi, nilai rerata rasio IWV COSMIC-2 > 2 km terhadap IWV radiosonde hanya bernilai 0,46, sedangkan rerata rasio IWV COSMIC-2ext terhadap IWV radiosonde sebesar $0,98 \approx 1$. Hasil ini mengindikasikan bahwa penerapan model ekstrapolasi terhadap profil kelembapan untuk estimasi total IWV berhasil mendekati akurasi data hasil pengukuran radiosonde.

1. Kemajuan Penerapan RO pada Prediksi Cuaca Numerik

Keunggulan observasi atmosfer menggunakan teknologi GNSS RO adalah mampu merekam data di wilayah yang sulit terjangkau untuk pengamatan dengan balon radiosonde. Wilayah yang dimaksud adalah seperti lautan dan samudra, wilayah pegunungan tinggi, serta wilayah kutub utara dan kutub selatan. Pengamatan profil atmosfer dengan balon radiosonde di wilayah laut dan samudra memerlukan upaya menuju ke titik tertentu di tengah laut menggunakan kapal riset. Sangat sulit untuk mendapatkan data secara kontinyu karena tentu akan memakan biaya sangat tinggi. Demikian pula upaya pengamatan radiosonde di daerah pegunungan dan kutub. Di wilayah kutub, keterbatasan waktu pengamatan disebabkan salah satunya karena gaya Coriolis mencapai maksimum sehingga kecepatan angin menjadi sangat tinggi yang dapat membahayakan saat pengisian balon dengan udara hidrogen atau halogen.

Dewasa ini, teknologi GNSS RO mampu mengukur profil atmosfer di seluruh wilayah global. Apalagi dengan adanya satelit konstelasi baru COSMIC-2, kebutuhan pengamatan untuk memperoleh data di wilayah yang sulit dijangkau oleh tenaga manusia, seperti samudra dan pegunungan dapat teratasi. Profil RO juga memberi keuntungan

dalam hal resolusi ketinggian dan cakupan ketinggian. Secara umum, pengamatan balon radiosonde mencapai ketinggian rata-rata 30 km. Hal itu pun apabila pengamatan radiosonde menggunakan balon berukuran besar. Apabila sensor radiosonde dibawa dengan balon berukuran kecil 300–600 g maka capaian ketinggian yang bisa diukur oleh sensor radiosonde hanya sekitar 24–27 km. Adapun pengamatan satelit aktif non-RO, dapat mengamati profil, tetapi dengan resolusi rendah setiap ~ 3 km. Keunggulan pengamatan teknik RO menyediakan profil dengan resolusi mencapai 0,1 km di wilayah troposfer bawah, serta 1 km di wilayah stratosfer dengan cakupan ketinggian mencapai 50 km. Dengan demikian, selain resolusi vertikal tinggi, ketersediaan data hingga di ketinggian mencapai 50 km (1 hPa) hanya mampu diukur dengan teknologi RO.

Mengingat keuntungan yang dijelaskan dalam bagian sebelumnya, pengukuran RO dapat diterapkan pada operasional *numerical weather prediction* (NWP) dan pemantauan iklim. Awalnya, data RO secara operasional diasimilasikan ke dalam sistem Prediksi Cuaca Numerik di ECMWF, NCEP, dan Met Office. Hasil beberapa penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa pengukuran RO mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap NWP. Pada 12 Desember 2006, ECMWF mulai mengasimilasi data RO yang diperoleh dari COSMIC secara operasional dan berhasil memberi penurunan signifikan dalam bias rata-rata untuk perkiraan dan analisis jangka pendek di belahan bumi selatan (Luntama, 2008). Menurut Luntama (2008), setelah NCEP memasukkan data COSMIC RO ke dalam sistem asimilasinya, skor korelasi anomali pada 500 hPa untuk belahan bumi selatan meningkat sebesar 4,5 jam dalam periode prediksi tujuh hari. Hasil serupa diperoleh pada ketika Met Office mengasimilasi refraksi CHAMP dan GRACE ke dalam sistem perkiraan operasional mereka. Prakiraan tersebut meningkat secara signifikan untuk wilayah troposfer atas dan stratosfer bawah (UTLS) di belahan bumi selatan.

Model ekstrapolasi untuk mengestimasi profil kelembapan spesifik telah menunjukkan kontribusi untuk melengkapi kekosongan data di dekat permukaan. Oleh karena itu, total kandungan uap air

terintegrasi dapat dihitung secara menyeluruh. Nilai kandungan uap air terintegrasi ini dapat dijadikan input untuk pengembangan model, baik model numerik dinamik atau pun model statistik. Dalam hal pengembangan model numerik, input data total kandungan uap air terintegrasi akan memberikan kontribusi analisis ketersediaan udara lembap di atmosfer yang berkaitan dengan pertumbuhan awan kumulus, sedangkan dalam kaitannya dengan pengembangan model statistik, input total kandungan uap air terintegrasi dapat dimanfaatkan untuk menganalisis perambatan gelombang atmosfer yang bersesuaian dengan pertumbuhan awan dengan jangka skala waktu tertentu.

Pengembangan model prediksi cuaca numerik mengasimilasikan input data total kandungan uap air terintegrasi. Seperti telah diketahui bahwa kondisi anomali cuaca dan iklim wilayah Indonesia dipengaruhi oleh fenomena atmosfer multi skala waktu. Terutama fenomena atmosfer yang terbentang di sepanjang sabuk ekuator. Dengan adanya ketersediaan data GNSSRO yang mencakup seluruh wilayah global, terutama daerah sepanjang tropis yang mencakup Benua Afrika, Samudra Hindia, wilayah Kepulauan Maritim Indonesia, Samudra Pasifik, daratan Amerika Selatan, hingga Samudra Atlantik maka kondisi dinamika atmosfer tropis yang memengaruhi kondisi cuaca wilayah Indonesia dapat diketahui dan diprediksi. Pengembangan model prediksi cuaca numerik ini dapat menjadi salah satu upaya untuk mengantisipasi anomali cuaca dan iklim yang dapat memengaruhi kondisi pertanian di Indonesia sehingga berdampak pada ketahanan pangan.

F. Penutup

Observasi vertikal atmosfer berbasis teknologi GNSSRO memiliki keterbatasan dalam hal capaian perekaman data di dekat permukaan. Secara statistik, penetrasi okultasi rata-rata hanya mencapai ketinggian 0,8 km dengan rentang luar hingga 1,5 km. Akibatnya, terdapat kekosongan data pada profil hasil pengamatan GNSSRO di bawah ketinggian capaian penetrasi okultasi. Kekosongan data pada

variabel kelembapan menjadi pertanyaan riset terkait bagaimana cara melengkapi profil sehingga dapat dimanfaatkan untuk estimasi total kandungan uap air di atmosfer.

Riset ini mengembangkan model ekstrapolasi linier kuadratik pada setiap profil kelembapan atmosfer $q(z)$. Persamaan kuadrat me-
ngandung dua koefisien masing-masing untuk variabel kuadrat dan linier, serta konstanta yang dicari dengan model penapisan. Penerapan model penapisan pada tiap profil kelembapan menghasilkan rerata koefisian untuk variabel kuadrat dan variabel linier berurut-urut sebesar 0,13 dan -2,90. Konstanta persamaan kuadrat bernilai 17,12 yang berarti bahwa pada $z = 0$ km $q_{mod}(0)$ sama dengan 17,12 g/kg.

Data standar deviasi q_{rs} hasil pengamatan radiosonde digunakan untuk menambahkan fluktuasi pada q_{mod} . Rasio hasil integrasi q_{obs} di atas ketinggian 2 km terhadap total IWV dari permukaan bernilai ~0,5. Integrasi profil gabungan antara q_{obs} dan q_{mod} menunjukkan nilai total IWV yang mendekati IWV hasil pengamatan radiosonde dengan rasio 0,98. Penerapan model ekstrapolasi berhasil menunjukkan data estimasi total kandungan uap air secara akurat. Oleh karena itu, hasil pengembangan model ini dapat diterapkan untuk studi lebih lanjut terkait variabilitas total kandungan uap air berdasarkan pengamatan GNSSRO.

Referensi

- Andrews, D. G., Leovy, C. B., & Holton, J. R. (2016). *Middle atmosphere dynamics* (Vol. 40). Academic Press.
- Anthes, R. A. (2011). Exploring Earth's atmosphere with radio occultation: contributions to weather, climate and space weather. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(6), 1077–1103.
- Anthes, R. A., Bernhardt, P. A., Chen, Y., Cucurull, L., Dymond, K. F., Ector, D., Healy, S. B., Ho, S., Hunt, D. C., Kuo, Y., Liu, H., Manning, K., McCormick, C., Meehan, T. K., Randel, W. J., Rocken, C., Schreiner, W. S., Sokolovskiy, S. V., Syndergaard, S., . . . Zeng, Z. (2008). The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission: Early results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(3), 313–334. <https://doi.org/10.1175/bams-89-3-313>

- Anthes, R. A., Rocken, C., & Ying-Hwa, K. (2000). Applications of COSMIC to meteorology and climate. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 11(1), 115–156.
- Ding, T., Awange, J. L., Scherllin-Pirscher, B., Kuhn, M., Khandu, N., Anyah, R., Zerihun, A., & Bui, L. K. (2022). GNSS radio occultation infilling of the African Radiosonde data gaps reveals drivers of tropopause climate variability. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 127(17). <https://doi.org/10.1029/2022jd036648>
- Ho, S., Anthes, R. A., Ao, C. O., Healy, S., Horanyi, A., Hunt, D., Mannucci, A. J., Pedatella, N., Randel, W. J., Simmons, A., Steiner, A., Xie, F., Yue, X., & Zeng, Z. (2020). The COSMIC/FORMOSAT-3 radio occultation mission after 12 years: Accomplishments, remaining challenges, and potential impacts of COSMIC-2. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(7), E1107–E1136. <https://doi.org/10.1175/bams-d-18-0290.1>
- Holton, J. R. (2004). *An introduction to dynamic meteorology* (4th ed.). Elsevier Academic Press.
- Kirchengast, G. (1999). *A simple analytical atmospheric model for radio occultation applications*. Institute of Meteorology and Geophysics, University of Graz.
- Lonitz, K. (2023). *GNSS radio occultation (GNSS-RO): Principles and NWP use*. ECMWF. https://events.ecmwf.int/event/334/contributions/3890/attachments/2235/3952/01_gpsro_lecture_KL_2023.pdf
- Luntama, J., Kirchengast, G., Borsche, M., Foelsche, U., Steiner, A., Healy, S., Von Engeln, A., O'Clerigh, E., & Marquardt, C. (2008). Prospects of the EPS GRAS Mission for operational atmospheric applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(12), 1863–1876. <https://doi.org/10.1175/2008bamS-2399.1>
- Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J., & Tasa, D. G. (2013). *The atmosphere: An introduction to meteorology* (12th ed.). Pearson.
- NCEI-NOAA. (2018, 8 Februari). *Integrated global radiosonde archive*. Diakses 1 Juni, 2021, dari <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-balloon/integrated-global-radiosonde-archive>.
- Noersomadi. (2019). *Characteristics of tropical tropopause and stratospheric gravity waves analyzed using high resolution temperature profiles from GNSS radio occultation* [Disertasi tidak diterbitkan]. Kyoto University.

- Reigber, C., Lühr, H., & Schwintzer, P. (Ed.). (2012). *First CHAMP mission results for gravity, magnetic and atmospheric studies*. Springer Science & Business Media.
- Rother, M., & Michaelis, I. (2019). *CH-ME-3-MAG-CHAMP 1 Hz combined magnetic field time series (level 3)*. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/GFZ.2.3.2019.004>
- Schreiner, W. S., Weiss, J. P., Anthes, R. A., Braun, J., Chu, V., Fong, J., Hunt, D., Kuo, Y.-H., Meehan, T., Serafino, W., Sjoberg, J., Sokolovskiy, S., Talaat, E., Wee, T. K., & Zeng, Z. (2020). COSMIC-2 radio occultation constellation: First results. *Geophysical Research Letters*, 47(4), e2019GL086841.
- Sievert, T. (2019). *GNSS radio occultation inversion methods and reflection observations in the lower troposphere* [Doctoral dissertation]. Blekinge Tekniska Hogskola. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1277418/FULLTEXT02.pdf>
- Sokolovskiy, S. V. (2001). Tracking tropospheric radio occultation signals from low Earth orbit. *Radio Science*, 36(3), 483–498.
- Steiner, A., Gobiet, A., Foelsche, U., & Kirchengast, G. (2004). *Radio occultation data processing advancements for optimizing climate utility*. Institute for Geophysics, Astrophysics, and Meteorology, University of Graz.
- Wickert, J., Beyerle, G., Schmidt, T., Marquardt, C., König, R., Grunwaldt, L., & Reigber, C. (2003). GPS radio occultation with CHAMP. Dalam C. Reigber, H. Lühr, & P. Schwintzer (Ed.), *First CHAMP mission results for gravity, magnetic and atmospheric studies* (371–383). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-38366-6_53
- Wickert, J., Reigber, C., Beyerle, G., König, R., Marquardt, C., Schmidt, T., Grunwaldt, L., Galas, R., Meehan, T. K., Melbourne, W. G., & Hocke, K. (2001). Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP. *Geophysical Research Letters*, 28(17), 3263–3266.
- Wilks, D. S. (2005). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (2nd ed., Vol. 100 of International Geophysics). Elsevier Science.
- Wu, D. L., Gong, J., & Ganeshan, M. (2022). GNSS-RO deep refraction signals from moist marine atmospheric boundary layer (MABL). *Atmosphere*, 13(6), 953. <https://doi.org/10.3390/atmos13060953>
- Zhang, C. (2005). Madden-Julian oscillation. *Reviews of Geophysics*, 43(2). <https://doi.org/10.1029/2004rg000158>

Bab X

EWS SIPANTARA: Implementasi Prediksi Iklim Menggunakan Kecerdasan Buatan

Muhammad Agung Sunusi, Aris Pramudia, Adi Ripaldi, Darmawan Lahru Riatma, Erni Susanti, Suciantini, Yudi Riadi Fanggidae, Ferrari Pinem, Kharmila Sari Hariyanti, Rahmawati, Asmarhansyah, Yuliastuti Purwaningsih, Aneng Hermami, Antoni Setiawan, Muhamad Roy Setiawan Tambunan, Desy Rakhma Caesaran Utomo, Hendry Puguh Suseptyo, Slamet Riyadi, Andi Abdurahim, Ella Windy Rahmatika, Aidil Azhar

A. Urgensi Sistem Peringatan Dini dan Pengaturan Jadwal Tanam Hortikultura

Salah satu program dari Kementerian Pertanian adalah pemenuhan kebutuhan pangan bagi 267 juta jiwa penduduk Indonesia. Pemenuhan kebutuhan pangan tersebut meliputi pangan strategis nasional di antaranya padi, jagung, kedelai, cabai, bawang merah, bawang putih, daging sapi, daging ayam, gula, telur, minyak goreng. Berdasarkan Kepmentan Nomor 104 Tahun 2020 bahwa komoditas Binaan Direktorat Jenderal Hortikultura terdiri 569 jenis yang terdiri dari 82 jenis sayuran, 66 jenis tanaman obat, 60 jenis buah, dan 361 jenis tanaman hias. Di antara kelompok sayuran terdapat aneka cabai dan bawang

M. A. Sunusi, A. Pramudia, A. Ripaldi, D. L. Riatma, E. Susanti, dkk.
Kementerian Pertanian, *e-mail:* mohagungsunusi@pertanian.go.id

© 2024 Editor & Penulis

Sunusi, M. A., Pramudia, A., Ripaldi, A., Riatma, D. L., Susanti, E., dkk. (2024). EWS SIPANTARA: Implementasi prediksi iklim menggunakan kecerdasan buatan. Dalam D. E. Nuryantoro & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (291–320). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1244.c1394.
E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

merah, merupakan komoditas strategis yang selama ini memberikan sumbangsih signifikan terhadap inflasi-deflasi bahan pangan.

BPS (2018) menyatakan bahwa bawang merah merupakan salah satu komoditas yang potensial meningkatkan garis kemiskinan dengan indeks 1,32 di perkotaan dan 1,51 di perdesaan. Dengan demikian, memiliki pengaruh yang cukup besar dalam perekonomian Indonesia. Komoditas bawang merah, karenanya, jika tidak dikelola dengan baik akan mampu memengaruhi inflasi sebagai akibat tidak stabilnya pasokan bulanan yang berimbang kepada fluktuasi harga di tingkat konsumen. Fluktuasi harga yang cukup tinggi tersebut tentunya berpengaruh negatif terhadap sisi permintaan dan harga pada saat terjadi kelangkaan produksi. Lebih lanjut, hal ini akan memperbesar tingkat kemiskinan. Sebaliknya jika dikelola dengan baik, pengusahaan bawang merah merupakan peluang dalam usaha meningkatkan kesejahteraan petani dikarenakan keuntungan dari usaha tani bawang merah cukup tinggi, walaupun dengan tingkat risiko yang tinggi. Bawang merah pun mampu menggerakkan industri serta peningkatan status kesehatan masyarakat, mengingat bawang merah memiliki kandungan gizi yang baik. Namun, usaha tani bawang merah termasuk usaha tani yang berisiko tinggi karena dengan biaya produksi tinggi belum tentu menghasilkan produksi yang tinggi pula.

Komoditas lainnya yang menjadi prioritas utama di Direktorat Jenderal Hortikultura adalah komoditas aneka cabai. Pengembangan aneka cabai dilakukan melalui pendekatan terpadu beberapa komoditas terintegrasi antara kegiatan pusat, provinsi, dan kabupaten dalam pengembangan kawasan berbasis kampung hortikultura. Komoditas cabai dan bawang merah merupakan komoditas hortikultura strategis yang memberi sumbangsih signifikan terhadap inflasi-deflasi bahan pangan.

Salah satu penyebab terjadinya inflasi dan terjadinya penurunan produksi pada bulan-bulan tertentu untuk komoditas cabai dan bawang merah adalah lemahnya langkah mitigasi pada saat menghadapi akhir musim (*off season*). Berdasarkan angka tetap tahun 2015–2019 terlihat bahwa terdapat bulan waspada pada komoditas cabai besar dan cabai

rawit khususnya pada Desember–Februari. Meskipun produksi cabai besar pada tahun 2019 sebesar 1,20 juta ton, naik rata-rata 0,1% per tahun sejak 2017. Begitupun halnya dengan produksi cabai rawit tahun 2019 sebesar 1,37 juta ton, naik rata-rata 9,3% per tahun sejak tahun 2017. Permasalahan utama aneka cabai adalah tidak bisa disimpan dalam waktu yang lama sehingga pengaturan pola tanam sangat perlu dilakukan untuk menjaga pasokan utamanya pada musim hujan.

Angka tetap tahun 2014–2019 menggambarkan bahwa terdapat bulan waspada pada komoditas bawang merah pada Februari sampai April. Produksi bawang merah tahun 2019 sebesar 1,57 juta ton, naik rata-rata 5,3% per tahun sejak tahun 2014. Bawang merah memiliki keunggulan, yakni dapat disimpan selama 2–3 bulan sehingga surplus produksi dapat disimpan (stok) untuk menyuplai kebutuhan pada saat terjadi defisit. Berdasarkan data tersebut di atas diduga bulan waspada terjadi karena adanya kondisi *off season*/musim kemarau pada saat tanam dan pada saat panen terjadi musim hujan. Hal ini tentunya berdampak pada produksi dan produktivitas aneka cabai dan bawang merah yang mengalami penurunan pada bulan-bulan tertentu, yaitu Februari–April. Oleh karena itu, diperlukan langkah mitigasi yang tepat pada saat menghadapi bulan-bulan waspada tersebut. Langkah mitigasi ini dapat dilakukan 2–3 bulan sebelum dilakukan pertanaman.

Berkaitan dengan hal tersebut, dibutuhkan suatu informasi yang cepat dan akurat terkait aspek dampak perubahan iklim (DPI) dan organisme pengganggu tumbuhan (OPT) di kawasan penyangga nasional serta pengaturan jadwal tanam komoditas strategis nasional terutama dalam menghadapi *off season* kurang optimal. Kondisi real di lapangan menunjukkan bahwa kelompok tani sangat membutuhkan informasi tersebut untuk mengambil langkah pengamanan produksi akibat DPI (banjir dan kekeringan) dan informasi serangan OPT. Pengembangan Early Warning System (EWS) Perlindungan Hortikultura dapat menjadi solusi dan referensi pengamanan produksi di lapangan.

Direktorat Jenderal Hortikultura melalui Direktorat Perlindungan Hortikultura berkepentingan dalam menyajikan informasi terkait data berikut.

- 1) Data iklim: curah hujan bulanan, suhu udara rata-rata, kelembaban udara, intensitas cahaya matahari.
- 2) Data DPI: data banjir dan kekeringan, baik data waktu nyata (*real time*) maupun prediksinya.
- 3) Data OPT Dominan: data yang tersaji dengan baik tentunya akan menjadi modal yang sangat baik bagi *stakeholder* untuk mengambil langkah mitigasi yang tepat.

Data ini terhimpun dengan baik dalam aplikasi Early Warning System (EWS) Perlindungan Hortikultura dan Pengelolaan Tanam Komoditas Strategis (SIPANTARA). Berkaitan dengan hal tersebut maka pengembangan EWS SIPANTARA sangat penting karena menyajikan data yang sah dan *up to date* terkait peringatan dini DPI (banjir dan kekeringan) dan peluang sebaran OPT dominan di sentra penyangga hortikultura serta pengaturan jadwal tanam komoditas strategis hortikultura.

B. Pengelolaan Data Iklim dan Aksesibilitasnya untuk Sektor Pertanian

Posisi geografis Indonesia yang strategis, terletak di daerah tropis, di antara Benua Asia dan Benua Australia, di antara Samudra Pasifik dan Samudra Hindia, dilalui garis khatulistiwa, terdiri dari pulau dan kepulauan yang membujur dari barat ke timur, serta dikelilingi oleh luasnya lautan, menyebabkan wilayah Indonesia memiliki tingkat keragaman iklim dan cuaca yang tinggi. Keragaman iklim juga Indonesia dipengaruhi oleh aktivitas fenomena global terkait iklim, seperti Indian Ocean Dipole (IOD), El Niño Southern Oscillation (ENSO), El Niño, La Niña; fenomena regional seperti sirkulasi angin monsun Asia-Australia, daerah pertemuan angin antartropis, dan kondisi suhu permukaan laut sekitar wilayah Indonesia (Prasetyaningtyas, 2021).

Indonesia juga merupakan negara pertanian di mana pertanian memegang peranan penting dari keseluruhan perekonomian nasional. Hal ini dapat ditunjukkan dari banyaknya penduduk atau tenaga kerja yang hidup atau bekerja pada sektor pertanian dan produk nasional yang berasal dari pertanian (Mubyarto, 1983). Perubahan iklim sebagai dampak dari pemanasan global akan berdampak bagi Indonesia termasuk sektor pertanian. Sektor pertanian sangat rentan terhadap perubahan iklim karena berpengaruh terhadap pola tanam, waktu tanam, produksi, dan kualitas hasil (Nurdin & Si, 2011). Namun, adanya perubahan iklim tidak menyurutkan langkah Kementerian Pertanian untuk mendorong pertumbuhan dan produksi sektor pertanian.

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) sebagai institusi resmi pemerintah sesuai dengan Undang-Undang Nomor 31 Tahun 2009 tentang Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika wajib memberikan pelayanan informasi terkait meteorologi, klimatologi, dan geofisika, baik dalam pelayanan informasi rutin maupun peringatan dini. Salah satu informasi rutin yang disediakan oleh BMKG adalah penyediaan informasi musim, yaitu prakiraan curah hujan bulanan dan musim hujan maupun musim kemarau. Kemudian jenis peringatan dini yang disediakan salah satunya adalah peringatan dini iklim, meliputi peringatan dini El Niño, La Niña, peringatan dini kekeringan meteorologis, dan peringatan dini curah hujan tinggi.

Di sisi lain, jumlah penduduk Indonesia diperkirakan mencapai sekitar 275,77 juta jiwa (BPS, 2022). Setiap hari, masyarakat Indonesia membutuhkan pasokan pangan, termasuk sayur dan buah. Menindaklanjuti arahan dari Menteri Pertanian, para petani dan petugas lapangan terus diberikan pendampingan mengenai informasi iklim yang relevan untuk mendukung praktik budi daya hortikultura. Pendampingan ini perlu dilaksanakan secara berkelanjutan. Direktorat Jenderal Hortikultura melakukan bimbingan teknis dengan tema *Penerapan Informasi Iklim untuk Mendorong Budi Daya Hortikultura dengan Cara Implementasi Manajemen Iklim dalam Mendukung dalam Suksesnya Budi Daya Pertanian*. Informasi iklim merupakan hal yang

sangat penting dalam rangka peningkatan produksi dan nilai tambah produk hortikultura.

Oleh karena itu, diperlukan kombinasi dan integrasi sains, teknologi, serta ilmu leluhur untuk mencegah distorsi dalam produksi pangan sehingga produksi pangan tidak terhambat. Prediksi terhadap iklim makro maupun mikro serta penentuan jadwal tanam yang tepat untuk menentukan langkah adaptasi dan mitigasi yang lebih dini dalam penanganan dampak perubahan iklim menjadi hal yang konkret terhadap upaya real menjaga produksi hortikultura. Selain itu dibutuhkan juga langkah-langkah konkret dalam menangani dampak perubahan iklim di Indonesia. Selanjutnya dibutuhkan strategi dalam menyikapi perubahan iklim dengan cara antisipasi, adaptasi, dan mitigasi. Pemanfaatan informasi iklim menjadi hal yang penting dilakukan sebagai langkah adaptasi dengan menerapkan perencanaan budi daya tanaman dan penentuan jadwal tanam. Dengan langkah tersebut akan terbentuk kewaspadaan terhadap iklim ekstrem yang berdampak pada kebanjiran dan kekeringan.

Dengan pemanfaatan informasi iklim dan peringatan dini iklim yang dioptimalkan dengan baik, diharapkan bisa ditindaklanjuti dengan penggunaan teknologi tepat guna dalam meningkatkan produksi dan produktivitas hortikultura misalnya varietas tahan cekaman kering/basah, irigasi, dan naungan. Adaptasi lingkungan yang ideal di dataran medium membutuhkan teknologi untuk memanipulasi iklim mikro (suhu, kelembapan, radiasi, dan air tanah) sehingga menyediakan lingkungan yang ideal bagi pertumbuhan tanaman hortikultura. Adaptasi perubahan iklim dapat dilakukan dengan beberapa cara, seperti mengurangi suhu dan radiasi matahari serta meningkatkan kelembapan dan kadar air tanah dengan menggunakan teknologi naungan, irigasi mikro berupa kabut (*fog/mist irrigation*), dan mulsa. Selain itu, pertanian membutuhkan teknologi *smart farming* untuk membantu kegiatan budi daya dan mengurangi biaya produksi. Penerapan menggunakan teknologi otomasi digital (*internet of things/ IoT*) dan kecerdasan buatan (*artificial intelligence/AI*) misalnya sensor fisik dan iklim mikro untuk mengukur kondisi fisik dan lingkungan tanaman.

Dampak perubahan iklim dan kondisi iklim ekstrem yang sudah tidak terelakkan lagi maka didorong untuk segera mengimplementasikan pemanfaatan informasi iklim dalam suatu sistem peringatan dini khusus pada pada sub sektor hortikultura, melalui pemanfaatan data iklim dari BMKG, data OPT, data hortikultura yang dibuat dalam suatu sistem integrasi dan implementasi dengan didukung kecerdasan buatan. Dengan adanya sistem peringatan dini dan sistem informasi kalender tanam sektor hortikultura maka sistem secara keseluruhan tersebut akan membantu dalam pelaksanaan kegiatan budi daya hortikultura.

Keragaman pola curah hujan di Indonesia juga penting untuk diketahui informasinya. Dengan mengetahui keragaman tersebut maka jenis adaptasi dan waktu pelaksanaan adaptasi termasuk kalender tanamnya dapat disesuaikan dengan keragaman setempat. Sebagai contoh daerah yang memiliki pola curah hujan monsunal artinya daerah tersebut memiliki satu kali periode basah dan satu kali periode kering, dengan perbedaan jumlah hujan yang jelas antara periode musim hujan (basah) dan periode musim kemarau (kering) maka akan lebih jelas lagi jadwal kalender tanamnya. Melihat pola curah hujan yang berbeda-beda pada tiap daerah, perlu dilakukan penyesuaian potensi dan pola tanam pada daerah masing-masing, agar proses tanam, gangguan OPT, waktu pemupukan dan target produksi bisa lebih optimal. Bagaimanapun kondisi iklimnya, produksi tetap jalan, risiko bisa dikurangi, dan produktivitas hortikultura menjadi optimal. Dengan demikian, diharapkan cadangan pangan dan ketahanan pangan Indonesia bisa terjaga.

C. Perancangan Model Pemanfaatan Data Iklim untuk Sistem Peringatan Dini dan Jadwal Tanam Hortikultura

Sistem peringatan dini (*early warning system*) adalah serangkaian sistem yang berfungsi untuk memberitahukan akan terjadinya kejadian alam. Sistem peringatan dini ini akan memberitahukan terkait bencana yang akan terjadi atau kejadian alam lainnya. Untuk

kebutuhan perlindungan hortikultura, sistem peringatan dini juga terkait dengan peringatan terhadap peluang atau potensi terjadinya banjir, kekeringan, atau munculnya OPT tertentu terhadap komoditas tanaman hortikultura. Sistem peringatan dini merupakan suatu sistem informasi yang dilengkapi dengan penunjang keputusan berdasarkan model hubungan antarparameter. Aldrian (2016) menyatakan bahwa sebuah sistem peringatan dini merupakan strategi yang diperlukan untuk menghadapi dampak iklim ekstrem. Strategi tersebut dikembangkan dari manajemen pengelolaan data, analisis data hingga cara diseminasi yang tepat (Aldrian, 2016). Di dalam EWS SIPANTARA model-model yang sudah dan akan dikembangkan adalah model hubungan antara parameter curah hujan atau parameter iklim lainnya dengan luasan tanaman hortikultura yang terkena banjir, kekeringan, atau OPT. Beberapa model yang sudah pernah disusun, di antaranya model hubungan antara parameter iklim dengan luas serangan OPT bawang merah, model hubungan antara curah hujan dengan luas tanam dan pola tanam (Pramudia et al., 2024), serta model hubungan luas tanam dengan luas panen.

1. Model Peringatan Dini Banjir dan Kekeringan

Beberapa saintis sudah melakukan penelitian yang tujuannya untuk memodelkan sistem peringatan dini banjir berbasis naik turunnya ketinggian air (Natividad & Mendez, 2020; Nduru et al., 2022; Sarmidi & Rahmat, 2019). Natividad dan Mendez (2020) dengan menggunakan situs web dan/atau layanan pesan singkat untuk memberikan informasi terkait deteksi tinggi air dan potensi banjir, baik kepada individu maupun lembaga. Komunikasi bersifat interaktif sehingga dengan kata kunci SMS, masyarakat dapat mengetahui informasi kondisi air dan banjir. Sistem peringatan dini banjir yang dibangun oleh Nduru et al. (2022) berbasis *internet of things* (IoT). Menggunakan aplikasi yang dapat dimonitor dari jarak jauh, dapat diketahui tinggi dan debit air yang dapat diinformasikan ke masyarakat. Sebelumnya, Sarmidi dan Rahmat (2019) telah melakukan hal yang sama, yaitu meneliti ketinggian air dengan menggunakan sensor ultrasonik dengan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno. Sistem peringatan dini banjir

hortikultura bertujuan juga untuk memberi informasi mengenai kemungkinan banjir, tetapi kaitannya lebih pada kemungkinan banjir di lingkungan tanaman.

Deteksi dini untuk banjir biasanya dianalisis dengan menggunakan model matematika tertentu yang bermaksud untuk mendeteksi tren dan pola potensi banjir. Harapan dikembangkannya model ini adalah untuk memberi tahu petani tindakan yang harus dilakukan untuk mengantisipasi kemungkinan terjadinya banjir yang dapat mengurangi produksi mereka. Beberapa aksi dapat dilakukan petani untuk melindungi kerusakan tanaman dari banjir, seperti memperbaiki drainase di areal pertanaman, memperbaiki saluran, dan lain-lain. Namun, pertimbangan kondisi lokal, seperti topografi, jenis tanah dan sebagainya dapat memengaruhi luasan tanaman yang terkena banjir di suatu wilayah tertentu.

Sistem peringatan dini kekeringan sudah pernah dikemukakan beberapa saintis (Kemper, 2022; Sutanto et al., 2020; Laksono & Surgiyatna, 2020). Untuk menyusun peringatan dini kekeringan, Kemper (2022) membentuk *database* dengan menggunakan data iklim, pengindraan jauh (*remote sensing*), dan data sosial ekonomi. Sutanto et al. (2020) menyatakan bahwa penerapan metode pembelajaran mesin (*machine learning*) dapat digunakan untuk mempelajari prediksi dampak kekeringan sebagai bagian dari sistem peringatan dini kekeringan. Menurut mereka, sistem peringatan dini yang ada cenderung lebih fokus pada ancaman kekeringan daripada dampaknya. Sementara itu, Laksono dan Surgiyatna (2020) merancang sistem peringatan dini kekeringan berbasis *internet of things* (IoT) dengan memanfaatkan sistem pengukur curah hujan sebagai alat deteksi dini kekeringan. Potensi kekeringan pada pertanian diwujudkan dalam bentuk notifikasi dari alat ukur. Sistem peringatan yang menyampaikan informasi potensi kekeringan akan bermanfaat untuk memprakirakan dampak kekeringan di sekitar lingkungan pertanaman.

Informasi potensi kekeringan akan bermanfaat untuk meningkatkan kewaspadaan petani dan mempersiapkan petani menyiapkan langkah aksi yang harus diambil sehingga risiko kekeringan yang

berpengaruh terhadap produktivitas tanaman dapat diantisipasi atau diminimalisasi. Selain disampaikan ke petani, potensi kekeringan ini sebaiknya dapat tersampaikan ke pihak pemerintah dan juga pengelola sumber daya air sehingga pengaturan irigasi yang efisien dapat dilakukan.

Untuk melihat respons tanaman terhadap kekeringan perlu dibuat model hubungan antara tanaman dengan unsur-unsur iklim yang memberikan efek cukup besar terhadap kemungkinan terjadinya kekeringan di sekitar lokasi pertanaman. Dengan model tersebut diharapkan dapat memprakirakan dampak kekeringan di antaranya terhadap produksi tanaman. Model disusun dengan melihat korelasi antara unsur-unsur iklim terutama curah hujan dalam kaitan ketersediaan air untuk tanaman. Kekeringan tanaman biasanya terjadi karena curah hujan rendah dan ketersediaan air dalam tanah (kelengasan/kelembapan dalam tanah juga rendah) sehingga kebutuhan air tanaman tidak tercukupi, yang pada akhirnya mengganggu pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Cabai merupakan tanaman yang cukup banyak membutuhkan air sehingga irigasi sangat perlu diperhatikan, supaya produksi tidak menurun. Di samping itu, pada kondisi air kurang tersedia bagi tanaman menyebabkan tanaman kesulitan dalam menyerap hara/nutrisi yang dibutuhkan tanaman. Hubungan antara curah hujan dan kekeringan dapat berbeda-beda pada wilayah yang berbeda karena karakteristik iklim yang berbeda. Demikian pula dengan suhu udara, pada wilayah yang suhunya lebih tinggi, kemungkinan terjadi kekeringan pada tanaman bisa lebih cepat karena penguapan air dan tanah lebih cepat daripada tingkat penyediaan air untuk tanaman, di samping fungsi akar tanaman yang mungkin terganggu karena air sulit untuk diserap.

2. Model Peringatan Dini OPT

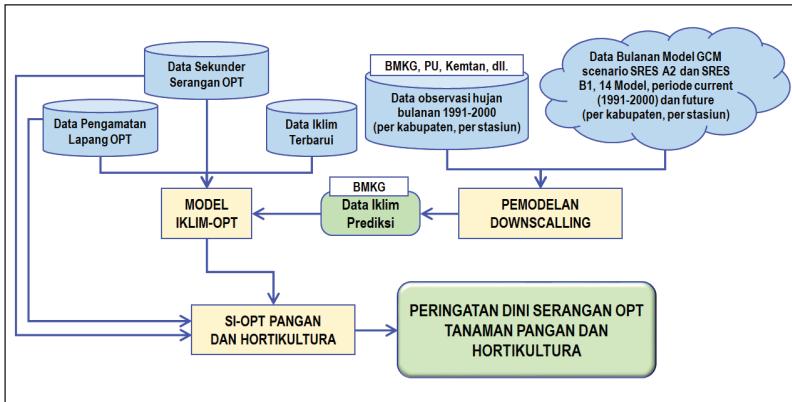
Kementerian Pertanian melalui Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian pernah mengembangkan Sistem Informasi OPT Hortikultura. Meledaknya serangan hama penyakit tanaman merupakan kejadian yang mengganggu produksi tanaman. Pada tanaman horti-

kultura khususnya bawang merah serangan hama penyakit tanaman bervariasi menurut waktu, jenis, dan luasannya (Pramudia et al., 2024). Meledaknya serangan hama penyakit tanaman, menunjukkan ada hubungan kuat dengan variabilitas iklim dan perubahan iklim yang terjadi. Ulat bawang merupakan hama utama yang menyerang tanaman bawang merah di Kabupaten Brebes. Berdasarkan data pengamatan tahun 1993–2010. Serangan ulat bawang pada musim kemarau lebih tinggi dibandingkan musim hujan (Susanti, 2018).

Upaya yang dapat dilakukan untuk menekan kehilangan hasil akibat serangan hama penyakit, di antaranya pemantauan terhadap dinamika serangan hama penyakit tanaman, identifikasi faktor-faktor iklim yang berpengaruh terhadap perkembangan dan distribusi serangan hama penyakit tanaman, penelitian membuat model hubungan serangan hama penyakit tanaman dengan parameter iklim, membangun sistem peringatan dini, adanya kelembagaan yang tepat dan akurat, serta penerapan sistem budi daya tanaman yang sehat dan diintegrasikan dalam teknologi pengelolaan hama dan penyakit tanaman secara terpadu. Model peramalan penyakit berdasarkan data cuaca dapat membantu mendeteksi faktor meteorologi (dan periode waktu) yang secara signifikan berkorelasi dengan penyakit. Model empiris, seperti model regresi dengan variabel iklim sebagai prediktor dan parameter epidemik sebagai variabel respons dapat digunakan untuk memprediksi keberhasilan organisme di berbagai kondisi yang diteliti (Garrett et al., 2006; Jeger & Pautasso, 2008). Hubungan antara iklim/dampak perubahan iklim dengan ledakan jenis hama penyakit tanaman banyak yang belum terjawab (Sigvald, 2012) sehingga ini merupakan tantangan yang harus segera dijawab agar dapat membangun model peringatan dini serangan hama penyakit tanaman dengan indikator parameter iklim.

Peringatan dini serangan organisme pengganggu tumbuhan perlu dikembangkan untuk menekan kehilangan hasil panen tanaman akibat serangan OPT di wilayah-wilayah endemik, memberikan informasi kemungkinan daerah yang terkena atau terdampak, melakukan tindakan preventif atau pencegahan dan meminimalisasi penggunaan

pestisida. Gambar 10.1 menyajikan konsep peringatan dini serangan OPT kaitannya dengan indikator iklim yang pernah dan masih memungkinkan dikembangkan di Indonesia.



Sumber: Susanti et al. (2018)

Gambar 10.1 Diagram Alir Peringatan Dini Luas Serangan Hama Penyakit Tanaman

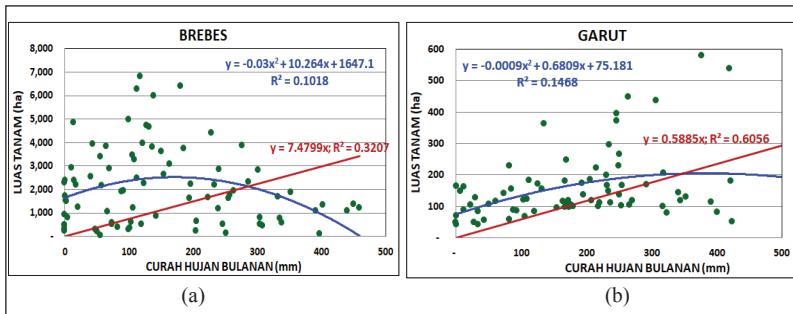
3. Model untuk Estimasi Jadwal Tanam dan Jadwal Panen

Berbagai faktor berperan dan menjadi pertimbangan dalam menentukan jadwal tanam tanaman hortikultura, di antaranya pola curah hujan. Pola curah hujan merupakan fluktuasi dari intensitas curah hujan sebagai fungsi waktu. Banyak komoditas baru ditanam dengan aman jika intensitas curah hujan pada awal tanam mencapai nilai tertentu. Dengan demikian, hubungan antara fluktuasi curah hujan dengan perkembangan luas tambah tanam tanaman hortikultura dapat membantu dalam penentuan jadwal dan pola tanam hortikultura berdasarkan kondisi prediksi curah hujan.

a. Hubungan Curah Hujan dengan Luas Tambah Tanam Bawang Merah

Gambar 10.2 menyajikan sebaran titik hubungan antara curah hujan (sumbu X) dengan luas tambah tanam (sumbu Y) di kecamatan-kecamatan sentra bawang merah di Kabupaten Brebes dan Kabupaten Garut. Kabupaten Brebes merupakan sentra bawang merah yang terletak pada dataran rendah atau pesisir, di mana penanaman bawang merah umumnya dilakukan pada lahan sawah irrigasi, sedangkan Kabupaten Garut merupakan sentra bawang merah yang terletak di dataran tinggi, di mana penanaman bawang merah umumnya dilakukan pada lahan tada hujan atau lahan kering. Terlihat bahwa baik di Kabupaten Brebes maupun di Kabupaten Garut memiliki hubungan positif antara curah hujan bulanan dengan luas tambah tanam. Artinya, secara matematika, peningkatan curah hujan berkorelasi dengan peningkatan luas tanam. Namun, jika memperhatikan lebih cermat sebaran titik-titik data bahwa secara kasat mata terlihat ada pola kuadratik negatif pada kedua grafik tersebut. Hanya saja nilai signifikansi persamaan kuadratik lebih rendah dibandingkan persamaan linear. Ke depan perlu mencari kembali teknik pemodelan yang lebih tepat antara kedua parameter tersebut.

Jika kita memperhatikan persamaan kuadrat dari sebaran titik-titik di kedua kabupaten, terlihat bahwa di Kabupaten Brebes, peningkatan curah hujan berkonotasi dengan peningkatan luas tanam rata-rata hingga pada intensitas curah hujan sebesar 171 mm/bulan, sedangkan di Kabupaten Garut, peningkatan curah hujan berkonotasi dengan peningkatan luas tanam rata-rata hingga pada intensitas curah hujan sebesar 378 mm/bulan. Setelah itu peningkatan curah hujan berkonotasi dengan penurunan luas tanam rata-rata. Secara detail dapat dilihat dalam Gambar 10.2.



Keterangan: X = sumbu horisontal, curah hujan bulanan (mm/bulan);

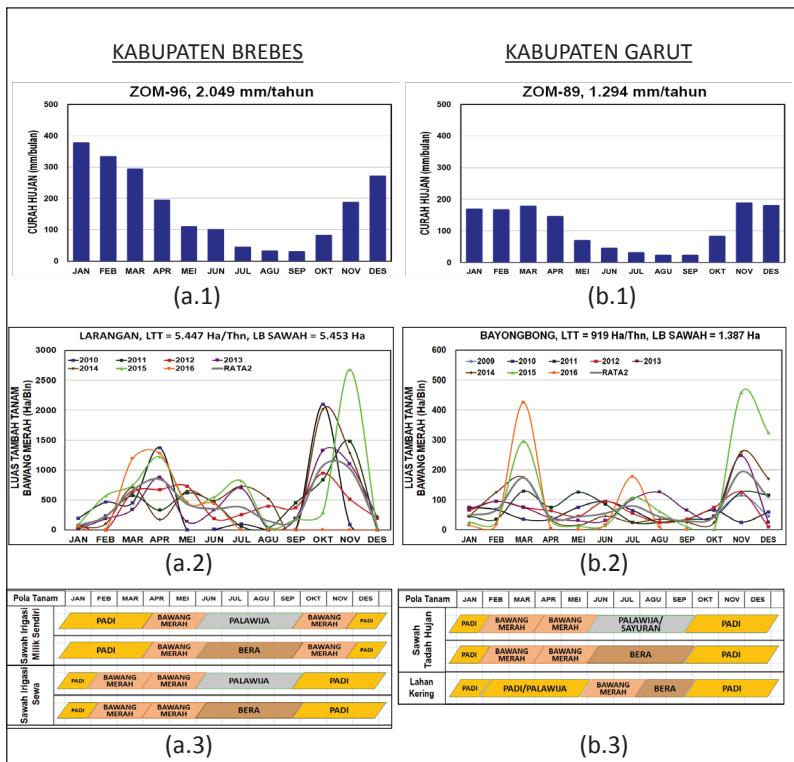
Y = sumbu vertikal, luas tambah tanam (Ha/bulan).

Sumber: Pramudia dan Hilman (2017)

Gambar 10.2 Hubungan Antara Curah Hujan dengan Luas Tambah Tanam Bawang Merah di Kabupaten Brebes (a) dan Kabupaten Garut (b)

b. Pola Curah Hujan, Puncak Tanam, dan Karakteristik Pola Tanam Bawang Merah

Rata-rata curah hujan di sentra bawang merah di Kabupaten Brebes sekitar 2.000 mm/tahun, sedangkan di Kabupaten Garut sekitar 1.250 mm/tahun (Gambar 10.3a.1 dan Gambar 10.3b.1). Data histori luas tambah tanam menggambarkan bahwa puncak tanam bawang merah di Kabupaten Brebes antara Oktober-November-Desember dan April-Mei-Juni. Di Kabupaten Garut puncak tanam bawang merah antara November-Desember-Januari di lahan sawah tada hujan, serta pada Juni di lahan kering (Gambar 10.3a.2 dan Gambar 10.3b.2).



Gambar 10.3 Kondisi Pola Curah Hujan, Perkembangan Luas Tambah Tanam, dan Pola Tanam Bawang Merah di Kabupaten Brebes (a) dan Kabupaten Garut (b)

Pramudia dan Puspitasari (2017) mengemukakan bahwa terdapat enam karakter pola tanam di sentra produksi bawang merah. Di sentra bawang merah Kabupaten Brebes terdapat dua pola pertanaman bawang merah, satu dengan lainnya dibedakan antara petani dengan kepemilikan lahan sendiri dan petani yang menyewa lahan. Pada kedua pola tersebut, bawang merah ditanam di lahan sawah irigasi dengan sistem surjan. Pada petani dengan kepemilikan sendiri menerapkan budi daya bawang merah sebagai tanaman pertama setelah memasuki musim hujan. Setelah panen bawang merah, dilanjutkan

dengan budi daya padi sebagai tanaman kedua. Setelah panen padi, dilanjutkan kembali dengan bawang merah sebagai tanaman ketiga. Tanaman keempat disesuaikan dengan kondisi curah hujan dan ketersediaan air. Jika curah hujan tinggi atau ketersediaan air cukup, petani menerapkan palawija atau sayuran tertentu. Jika curah hujan rendah atau ketersediaan air kurang, petani tidak menerapkan bera. Pada petani yang menyewa lahan umumnya selama setengah tahun, memasuki musim hujan, petani menerapkan budi daya padi sebagai tanaman pertama. Setelah panen padi, dilanjutkan dengan budi daya bawang merah dua kali sebagai tanaman kedua dan ketiga. Tanaman keempat disesuaikan dengan kondisi curah hujan dan ketersediaan air. Jika curah hujan tinggi atau ketersediaan air cukup, petani menerapkan palawija atau sayuran tertentu. Jika curah hujan rendah atau ketersediaan air kurang, petani menerapkan bera (Gambar 10.3.a.3).

Kabupaten Garut, penanaman bawang dilakukan pada lahan tada hujan atau lahan kering. Pola tanam bawang pada lahan sawah tada hujan umumnya berada pada ketinggian antara 400–800 meter di atas permukaan laut, pada lahan sendiri atau sewa dengan periode sewa setengah tahun. Sumber air yang digunakan adalah air irigasi sederhana yang sumber utamanya adalah dari curah hujan. Sistem pengaturan tata air pada budi daya bawang menggunakan guludan dan parit drainase. Memasuki musim hujan, petani menerapkan budi daya padi sebagai tanaman pertama. Setelah panen padi, dilanjutkan dengan budi daya bawang merah dua kali sebagai tanaman kedua dan ketiga menggunakan varietas yang cocok untuk kondisi di dataran tinggi. Tanaman keempat disesuaikan dengan kondisi curah hujan dan ketersediaan air. Jika curah hujan tinggi atau ketersediaan air cukup, petani menerapkan sayuran berumur pendek. Jika curah hujan rendah atau ketersediaan air kurang, petani menerapkan bera. Pola tanam bawang pada lahan kering umumnya berada pada ketinggian antara 800–1200 meter di atas permukaan laut, pada lahan sendiri atau sewa selama setahun yang sebelumnya dimanfaatkan untuk budi daya padi. Sumber air yang digunakan adalah curah hujan. Memasuki musim hujan, petani menerapkan budi daya padi sebanyak dua kali sebagai

tanaman pertama dan tanaman kedua. Setelah panen padi kedua, dilanjutkan dengan budi daya bawang merah sebagai tanaman ketiga. Sistem pengaturan tata air pada budi daya bawang menggunakan guludan dan parit drainase. Pemilihan bawang merah sebagai tanaman ketiga, karena memiliki nilai ekonomis yang lebih tinggi dibandingkan tanaman sayuran lainnya. Menggunakan varietas bawang merah yang cocok untuk kondisasi di dataran tinggi (Gambar 10.3b.3).

c. Hubungan Jadwal Tanam dengan Jadwal Panen pada Tanaman Bawang Merah

Pramudia dan Hilman (2017) memperlihatkan adanya perbedaan panjang musim tanam bawang merah antara sentra bawang merah di pesisir (Brebes) dan di dataran tinggi (Garut) sebagaimana hasil analisis yang disajikan pada Tabel 10.1. Tabel 10.1 memperlihatkan nilai korelasi antara luas tanam dengan luas panen bawang merah pada bulan yang sama, dan pada bulan-bulan dengan jeda-1, -2, dan -3 bulan. Terlihat bahwa nilai korelasi tertinggi di Brebes terdapat pada lag-2, sedangkan di Garut pada lag-3. Hal ini menunjukkan bahwa umur bawang merah di Kabupaten Brebes umumnya adalah dua bulan, sedangkan umur bawang merah di Garut umumnya adalah tiga bulan. Pernyataan ini menguatkan bahwa umur bawang merah di dataran tinggi, seperti di Garut, cenderung lebih lama dibandingkan yang ditanam di dataran rendah, seperti di Brebes.

Tabel 10.1 Nilai Koefisien Korelasi antara Luas Tanam dan Luas Panen Bawang Merah untuk Bulan yang Sama, Jeda -1, -2, dan -3 Bulan

Parameter	Garut	Brebes
Luas Tanam-Panen lag-0	0,2469	-0,168
Luas Tanam-Panen lag-1	0,2301	0,252
Luas Tanam-Panen lag-2	0,4415	0,643
Luas Tanam-Panen lag-3	0,7317	0,108
Jumlah data (N)	226	216

Sumber: Pramudia dan Hilman (2017)

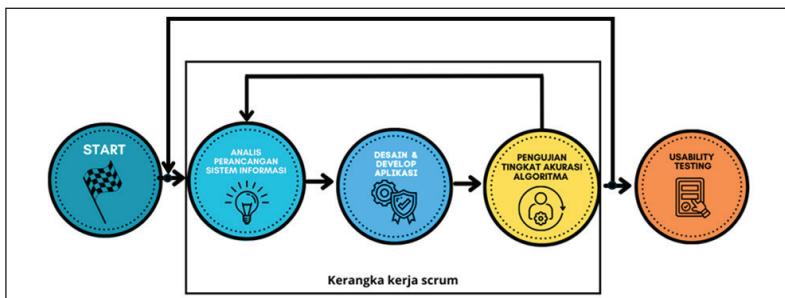
- d. Penyusunan Sistem Peringatan Dini dan Jadwal Tanam Hortikultura berbasis Spasial

1) Pengembangan Aplikasi EWS SIPANTARA

Aplikasi EWS SIPANTARA dikembangkan menggunakan kerangka kerja *agile scrum*, sebagai bagian dari metode *agile software development*, yaitu proses pengembangan yang dilakukan bertahap bagian demi bagian (*incremental*), secara cepat, serta melibatkan berbagai pemangku kepentingan secara langsung (Summerville, 2011). Terdapat tiga tahapan dalam proses pengembangan, yaitu

- 1) analisis perancangan sistem informasi,
- 2) desain dan pengembangan aplikasi, dan
- 3) pengujian tingkat akurasi algoritma.

Semuanya melibatkan multidisiplin anggota Tim Pengembang EWS SIPANTARA, di antaranya analis data Badan Meteorologi dan Geofisika; periset Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi Badan Inovasi dan Riset Nasional; analisis geospasial Badan Informasi Geospasial; fungsional Pengamat OPT Kementerian Pertanian; periset Terapan dari Sekolah Vokasi UNS; serta kepakaran anggota tim lainnya. Tahap pengembangan aplikasi dilengkapi uji coba dan verifikasi penggunaan aplikasi di lapang. Secara sederhana proses pengembangan EWS SIPANTARA disajikan pada Gambar 10.4.



Sumber: Lawong dan Akanfe (2024)

Gambar 10.4 Tahapan Riset dan Pengembangan EWS SIPANTARA

Berikut adalah penjelasan dari Gambar 10.4.

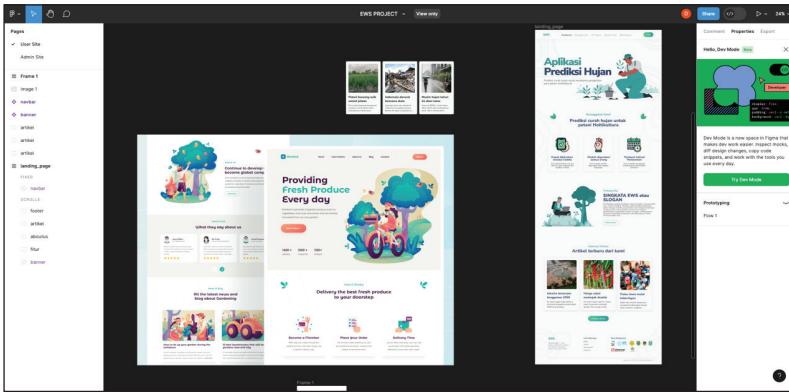
1) Analisis perancangan sistem

Tahapan awal dari perancangan dan pengembangan perangkat lunak adalah analisis kebutuhan. Analisis kebutuhan atau penentuan persyaratan sangat diperlukan (Chastine, 2019) untuk menghindari kesalahan dalam pembangunan perangkat lunak (Davis, 1993; Leffingwell, 1997; Siahaan, 2012; Siahaan & Umami, 2012; Rosiyadi, 2013; Hofmann, 2001). Spesifikasi kebutuhan sebagai bagian dari kebutuhan teknik terutama berurusan dengan bagaimana mengekspresikan kebutuhan secara spesifik, terukur, dapat direalisasikan, dapat dicapai, dan terikat waktu. Ada beberapa teknik dalam elisitasi kebutuhan untuk meningkatkan pemahaman pengetahuan domain, seperti wawancara pengguna, kuesioner, analisis dokumen, dan curah pendapat (*brainstorming*). Dalam pengembangan EWS SIPANTARA, beberapa kebutuhan yang diperlukan dalam sistem, antara lain bahwa sistem diarahkan untuk memanfaatkan informasi prediksi curah hujan dari lembaga berwenang, mampu menyajikan informasi tentang peringatan dini banjir, kekeringan, dan OPT pada tanaman bawang merah dan aneka cabai, dan mampu menyajikan jadwal tanam optimum atau *minimum risk* bagi tanaman bawang merah dan aneka cabai, serta mampu menyajikan informasi secara tabular maupun spasial. Dengan demikian, akan diperlukan model-model hubungan antara parameter curah hujan dengan kejadian dampak perubahan iklim dan OPT yang dipelajari berdasarkan luas kerusakannya, serta model hubungan antara curah hujan dengan jadwal tanam optimum yang dipelajari berdasarkan luas tambah tanam komoditas tersebut.

2) Desain dan pengembangan aplikasi

Tahapan kedua setelah analisis perancangan sistem adalah desain dan pengembangan aplikasi. Desain aplikasi ditujukan untuk membantu dan mempermudah pembuatan maket (*mockup*) aplikasi sebelum dimulai proses pengembangan oleh *programmer*. Dalam pengembangan EWS SIPANTARA desain aplikasi menggunakan *tools* Figma. Pada tahapan ini dimungkinkan adanya coba-coba (*trial and error*)

sehingga dimungkinkan terjadi beberapa kali revisi penggerjaan desain. Tahapan pengembangan dari sisi *programmer* dilakukan setelah hasil maket disajikan pada Gambar 10.5.



Keterangan: Tangkapan layar hasil desain *Tools Figma*

Sumber: Tim EWS SIPANTARA (2023)

Gambar 10.5 Hasil Desain Maket Menggunakan *Tools Figma*

Pengembangan aplikasi EWS SIPANTARA ini menggunakan arsitektur Progressive Web Apps (PWA). PWA sebenarnya hanyalah aplikasi berbasis web biasa, tetapi memanfaatkan fitur peramban yang modern agar tampil seolah-olah merupakan aplikasi asli. PWA digambarkan sebagai kumpulan dari teknologi, konsep desain, dan *web application programming interface* (Web API) yang bekerja secara bersama untuk memberikan sentuhan aplikasi pada sebuah *mobile web* (Rahul, 2016). Hal ini termasuk berbagai rekomendasi yang tidak spesifik pada desain aplikasi web untuk perangkat seluler, seperti preferensi HTTPS melalui HTTP dan desain yang responsif.

3) Pengujian tingkat akurasi algoritma

Pengujian tingkat akurasi algoritma menggunakan pengujian *white box testing*. Teknik pengujian *white box* adalah teknik perancangan uji kasus yang menggunakan struktur kontrol dan perancangan prosedural untuk mendapatkan *test case* (Pressman, 2010). Teknik

pengujian ini merupakan pengujian terhadap cara kerja perangkat lunak itu sendiri, yaitu *basis path* (prosedur programnya) atau proses *looping* (perulangannya) terhadap permasalahan yang cukup banyak (Khan, 2011), menggunakan proses *independent path*, menghitung *cyclomatic complexity* dan *graph matrices* (Syaikhuddin, 2018).

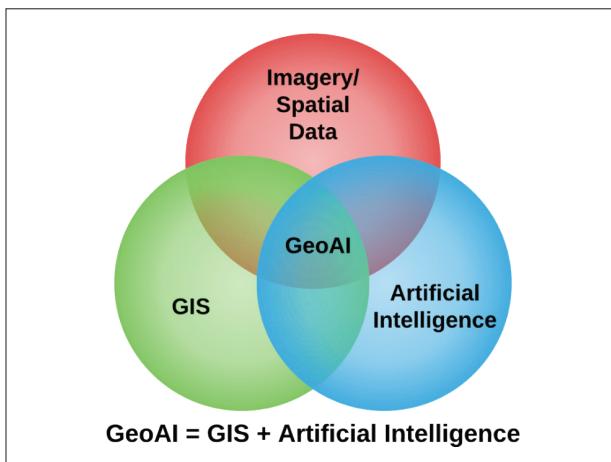
4) *Usability testing*

Usability berasal dari kata *usable* yang dalam pengertian secara umum berarti dapat digunakan dengan baik, dengan cara meminimalkan berbagai kegagalan dan kekurangan sehingga dapat meningkatkan kepuasan pengguna. McCall menyusun tiga bagian utama faktor kualitas, yaitu *product revision*, *product transition*, dan *product operation*, kemudian dibagi lagi menjadi 11 faktor kualitas perangkat lunak di mana faktor-faktor ini menjadi acuan dalam melihat kualitas sebuah produk perangkat lunak. Salah satu faktor yang termasuk di dalamnya, yaitu *usability*, ia mendefinisikan *usability* sebagai faktor di mana sebuah perangkat lunak harus dapat digunakan dengan mudah oleh penggunanya. Nielsen (McCall et al., 1977) mendefinisikan bahwa *usability* adalah suatu tolak ukur sebuah kualitas yang mengkaji serta mengukur seberapa mudah tampilan (*interface*) digunakan oleh pengguna.

2) Penerapan Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI) dalam EWS SIPANTARA

Geospatial artificial intelligence (GeoAI) adalah teknologi yang menggabungkan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI) dengan teknologi geospasial. GeoAI mengintegrasikan data geografis dan geospasial dengan metode AI untuk memahami, menganalisis, dan membuat keputusan berdasarkan informasi yang terkait dengan lokasi atau spasial (Döllner, 2020). Pengertian GeoAI mencakup berbagai teknologi AI, seperti *machine learning*, *deep learning*, *neural networks*, dan algoritma kecerdasan buatan lainnya, yang digunakan untuk memproses dan menganalisis data geospasial dalam skala besar dan kompleks (Moisa et al., 2022). GeoAI memungkinkan sistem kompu-

ter untuk mengenali pola dan relasi dalam data spasial, seperti citra satelit, peta, data sensor, dan data geografis lainnya (Song et al., 2023).

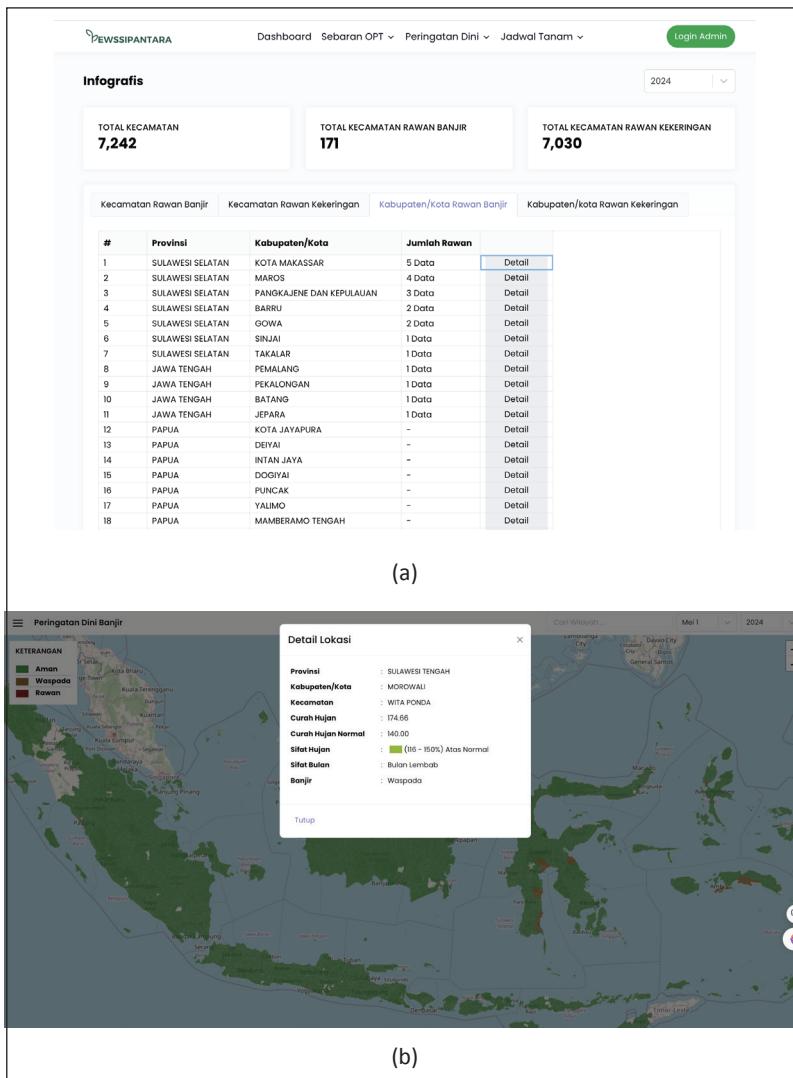


Sumber: Farda (2020)

Gambar 10.6 Geographical/Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI)

Terdapat beberapa *artificial intelligence* dan turunannya yang digunakan pada EWS SIPANTARA, salah satunya adalah penerapan *geospatial artificial intelligence* (GeoAI) untuk prediksi curah hujan dalam bidang pertanian. Prediksi curah hujan digunakan untuk mitigasi banjir dan kekeringan pada lahan pertanian cabai dan bawang di seluruh Indonesia. *Machine learning* telah kita latih untuk memahami pola curah hujan selama sepuluh tahun terakhir hasil yang didapatkan adalah sistem dapat menghasilkan keluaran data prediksi kecamatan yang rawan banjir dan kekeringan di Indonesia.

Data hasil keluaran *machine learning* selanjutnya diintegrasikan dalam peta spasial *geographic information system*, pada aplikasi ini kami menggunakan pemetaan dari *platform open street map*, *api google*, dan *platform windy*. Hasilnya aplikasi dapat menampilkan informasi peta sesuai legenda warna yang sumber datanya adalah data curah hujan yang bersumber dari BMKG.



Keterangan: Tangkapan layar aplikasi EWS SIPANTARA (a) dalam bentuk tabular; (b) dalam bentuk spasial.

Sumber: Tim EWS SIPANTARA (2023)

Gambar 10.7 Penyajian Informasi Hasil Terapan Kecerdasan Buatan dalam EWS SIPANTARA

Buku ini tidak diperjualbelikan.

D. Aplikasi EWS SIPANTARA dan Pemanfaatannya untuk Sektor Hortikultura.

Sistem Peringatan Dini (*Early Warning System*) Perlindungan Hortikultura dan Pengelolaan Tanam Komoditas Strategis (EWS SIPANTARA) adalah suatu sistem informasi yang berfungsi untuk peringatan dini dampak perubahan iklim (banjir, kekeringan), potensi serangan OPT, serta alat bantu yang menginformasikan jadwal tanam bawang merah, cabai merah, dan cabai rawit, disajikan secara tabular maupun secara spasial dalam bantuk peta, mencakup wilayah sentra tanaman hortikultura dan wilayah potensial pengembangannya. Informasi yang disajikan di dalam alat bantu ini di antaranya data luas terkena banjir, kekeringan, dan OPT bawang merah, cabai merah dan cabai rawit, data potensi kerawanan banjir, kekeringan, dan OPT, informasi potensi jadwal tanam untuk ketiga komoditas tersebut, serta ditambah informasi berita aktual popular lainnya, sebagaimana disajikan pada Gambar 10.7 hingga Gambar 10.10. Keunggulan EWS SIPANTARA, di antaranya

- 1) memberikan informasi prediksi iklim yang akurat dan terkini: kekeringan dan kebanjiran 3–5 bulan ke depan berbasis geospasial di 514 kabupaten/kota dan 7.242 kecamatan;
- 2) memberikan informasi jadwal tanam potensial yang tepat, berbasis geospasial sampai ke level kecamatan khususnya untuk komoditas aneka cabai dan bawang merah; dan
- 3) memberikan informasi lima besar OPT dominan pada komoditas aneka cabai dan bawang merah untuk memandu langkah antisipasi dan mitigasi di lapangan sesegera mungkin.



Keterangan: Tangkapan layar aplikasi EWS SIPANTARA

Sumber: Tim EWS SIPANTARA (2023)

Gambar 10.8 Halaman Depan Situs Web EWS SIPANTARA

#	Provinsi	Kabupaten/Kota	Kecamatan	Cabai Besar	Cabai Rawit	Bawang Merah
1	SUMATERA BARAT	PADANG PARIAHAN	2 X 11 ANAM UNGKUANG	Curah hujan optimal untuk cabai merah adalah 100-200mm/bulan		
2	SUMATERA BARAT			ANALISA		
3	SUMATERA BARAT			<ul style="list-style-type: none"> Agustus 2 CH=100 Agustus 3 CH=122 September 1 CH=115 September 2 CH=100 September 3 CH=121 Oktober 1 CH=118 Oktober 2 CH=115 Oktober 3 CH=156 November 1 CH=148 		
4	BAU					
5	SULAWESI					
6	PAPUA					
7	PAPUA					
8	BAU					
9	PAPUA					
10	SULAWESI					
11	SULAWESI		Tutup			
12	LAMPUNG	LAMPUNG UTARA	ABUNO BARAT			
13	LAMPUNG	LAMPUNG UTARA	ABUNO KUNANO			
14	LAMPUNG	LAMPUNG UTARA	ABUNO PEKURUN			
15	LAMPUNG	LAMPUNG UTARA	ABUNO SELATAN			

Halaman 1 dari 483 15 Data < Prev Next >

Main Menu
Direktorat Jenderal Hortikultura
BPS RI

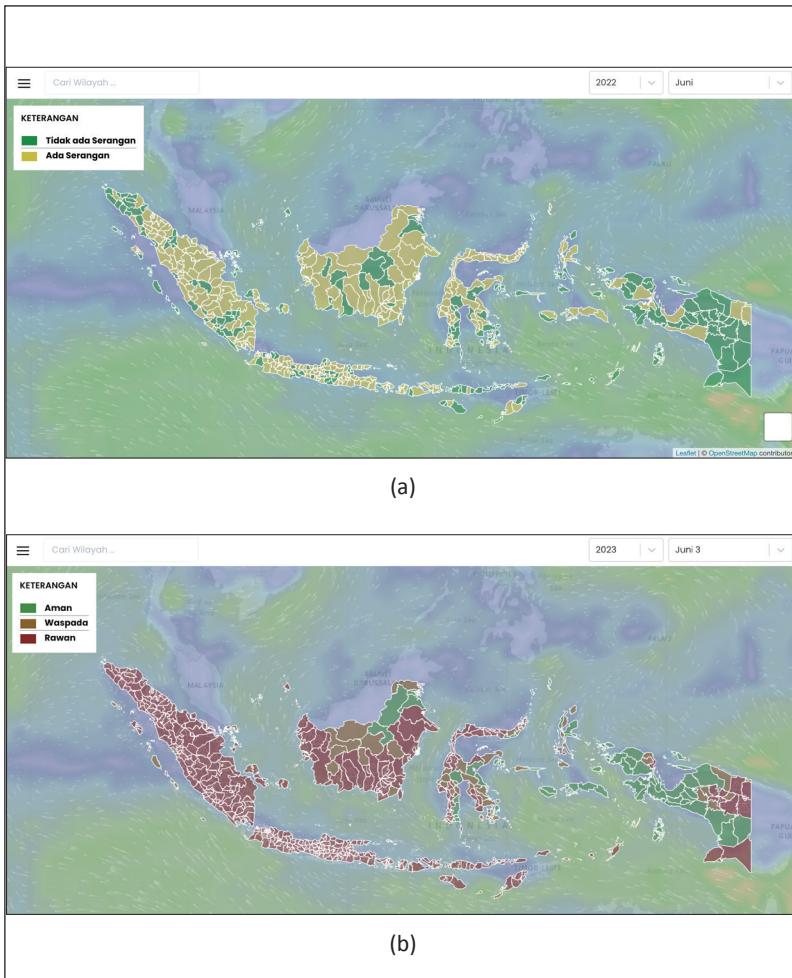
© 2023 EWS. All rights reserved.

Keterangan: Tangkapan layar aplikasi EWS SIPANTARA

Sumber: Tim EWS SIPANTARA (2023)

Gambar 10.9 Fitur Penyajian Informasi Potensi Jadwal Tanam Bawang Merah

Buku ini tidak diperjualbelikan.

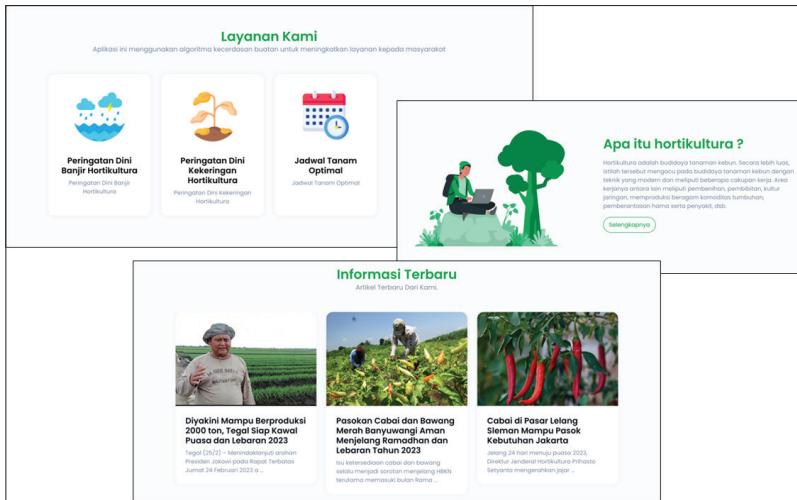


Keterangan: Tangkapan layar aplikasi EWS SIPANTARA (a) dan potensi kekeringan; (b) level kabupaten di seluruh Indonesia.

Sumber: Tim EWS SIPANTARA (2023)

Gambar 10.10 Fitur Penyajian Informasi Spasial Serangan OPT

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Keterangan: Tangkapan layar aplikasi EWS SIPANTARA

Sumber: Tim EWS SIPANTARA (2023)

Gambar 10.11 Beberapa Fitur Tambahan pada EWS SIPANTARA

E. Penutup

Penyusunan dan pengembangan EWS SIPANTARA sudah berjalan lebih dari dua tahun. Sejauh ini sudah tersusun modul untuk peringatan dini banjir dan kekeringan tanaman hortikultura, khususnya di sentra produksi tanaman hortikultura. Beberapa penunjang keputusan diterapkan dengan memanfaatkan hubungan antara parameter dari hasil-hasil riset yang sudah ada. Saat ini sedang dilakukan pengembangan dalam hal informasi potensi jadwal tanam bawang merah, cabai merah, dan cabai rawit, serta pembaruan hubungan antarparameter yang digunakan dalam pembuat keputusan untuk peringatan dini dan jadwal tanam. Ke depannya, diharapkan informasi yang disajikan di dalam sistem informasi ini dapat divalidasi di lapangan dan mendapat dukungan analisis ilmiah dan pendanaan yang memadai.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Referensi

- Aldrian, E. (2016). Sistem peringatan dini menghadapi iklim ekstrem. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 10(2), 79–90.
- BPS. (2018). *Statistik Indonesia 2018*. Badan Pusat Statistik.
- Davis, A. M. (1993). *Software requirements: objects, functions, and states*. Prentice-Hall, Inc.
- Döllner, J. (2020). Geospatial artificial intelligence: Potentials of machine learning for 3D point clouds and geospatial digital twins. *PFG – Journal of Photogrammetry Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(1), 15–24. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00102-3>
- Garrett, K. A., Dendy, S. P., Frank, E. E., Rouse, M. N., & Travers, S. E. (2006). Climate change effects on plant disease: genomes to ecosystems. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 44(1), 489–509.
- Hofmann, H. F., & Lehner, F. (2001). Requirements engineering as a success factor in software projects. *IEEE software*, 18(4), 58.
- Jeger, M. J., & Pautasso, M. (2008). Plant disease and global change: The importance of long-term data sets. *New Phytologist*, 177(1), 8–11.
- Kemper, H. (2022). Development of a drought early warning system based on the prediction of agricultural productivity: A data science approach. *GI_Forum*, 1, 58–76. https://doi.org/10.1553/giscience2022_01_s58
- Khan, M. E. (2010). Different forms of software testing techniques for finding errors. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 7(3), 24.
- Laksono, S. S., & Nurgiyatna, N. (2020). Sistem pengukur curah hujan sebagai deteksi dini kekeringan pada pertanian berbasis internet of things (IoT). *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, 20(2), 117–121.
- Leffingwell, D. (1997). Calculating the return on investment from more effective requirements management. *American Programmer*, 10(4), 13–16.
- McCall, J. A., Richards, P. K., & Walters, G. F. (1977). *Factors in software quality: Volume I. Concepts and definitions of software quality*. General Electric Company.
- Moisa, M. B., Gabissa, B. T., Hinkosa, L. B., Dejene, I. N., & Gemedo, D. O. (2022). Analysis of land surface temperature using Geospatial technologies in Gida Kiremu, Limu, and Amuru District, Western Ethiopia. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 6, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.06.002>

- Mubyarto. (1983). *Politik pertanian dan pembangunan pedesaan*. Sinarharapan.
- Natividad, J. G., & Mendez, J. M. (2018). Flood monitoring and early warning system using ultrasonic sensor. Dalam *IOP conference series: Materials science and engineering* (Vol. 325, Article 012020). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/325/1/012020>
- Nduru, S., Al Hafiz, A., & Pane, D. H. (2022). Implementasi metode fuzzy berbasis internet of things (IoT) untuk peringatan dini banjir. *Jurnal Sistem Komputer Triguna Dharma (JURSIK TGD)*, 1(1), 26–33.
- Nidhra, S., & Dondeti, J. (2012). Black box and white box testing techniques-a literature review. *International Journal of Embedded Systems and Applications (IJESA)*, 2(2), 29–50.
- Nurdin, S. P., & Si, M. (2011). Antisipasi perubahan iklim untuk keberlanjutan ketahanan pangan. *Jurnal Dialog Kebijakan Publik*, 4, 21–31.
- Pramudia, A., & Y. Hilman, Y. (2017). Hubungan keragaan luas tanam bawang merah dengan pola curah hujan di sentra produksi bawang merah. Dalam *Prosiding seminar nasional adaptasi dan mitigasi perubahan iklim* (717–730). Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber daya Lahan Pertanian.
- Pramudia, A., & Puspitasari. (2017). Karakteristik pola tanam di beberapa sentra produksi sebagai dasar penyusunan kalender tanam bawang merah. Dalam *Prosiding seminar nasional adaptasi dan mitigasi perubahan iklim* (211–220). Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian.
- Pramudia, A., Riatma, D. L., Sunusi, M. A., Ripaldi, A., Susanti, E., & Fanggidae, Y. R. (2024). Modeling of climate parameters with planting area and pest attacked area on shallots for the development of early warning systems and horticultural cropping schedules. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 1314, Article 012023). IOP Publishing.
- Prasetyaningtyas, K. (2021, 30 Agustus). *Prakiraan musim hujan 2021/2022 di Indonesia*. BMKG. <https://www.bmkg.go.id/berita/?p=prakiraan-musim-hujan-tahun-2021-2022-di-indonesia&lang=ID&s=detil>
- Pressman, R. S. (2010). *Rekayasa perangkat lunak*. Andi.
- Raharjana, I. K., Siahaan, D., & Faticah, C. (2019, Juli). User story extraction from online news for software requirements elicitation: A conceptual model. Dalam *2019 16th international joint conference on computer science and software engineering (JCSSE)* (342–347). IEEE.

- Rosyadi, I. (2013). *Analisis dan perancangan sistem informasi persediaan barang dengan menggunakan metode FAST pada CV. Tri Jaya* [Doctoral dissertation]. Universitas Brawijaya.
- Sarmidi, & Rahmat, S. I. (2019). Sistem peringatan dini banjir menggunakan sensor ultrasonik berbasis Arduino Uno. *Jurnal Manajemen dan Teknik Informatika JUMANTAKA*, 03(1), 31–41. <http://jurnal.stmik-dci.ac.id/index.php/jumantaka/>
- Siahaan, D. (2012). *Analisis kebutuhan dalam rekayasa perangkat lunak*. Andi Offset .
- Siahaan, D., & Umami, I. (2012). Natural language processing for detecting forward reference in a document. *IPTEK The Journal for Technology and Science*, 23(4).
- Sigvald, R. (2012). Risk assessments for pests and diseases of field crops, especially forecasting and warning systems. *Reducing the Risks Associated with the Use of Plant Protection Products no 25. Sust. Agric*, 1500, 185–201.
- Sommerville, I. (2003). *Software engineering (rekayasa perangkat lunak)* (Jilid 2). Erlangga.
- Song, Y., Kalacska, M., Gašparović, M., Yao, J., & Najibi, N. (2023). Advances in geocomputation and geospatial artificial intelligence (GeoAI) for mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 120, 103300. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103300>
- Susanti, E., Surmaini, E., & Estiningtyas, W. (2018). Parameter iklim sebagai indikator peringatan dini serangan hama penyakit tanaman. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 12(1), 59–70.
- Sutanto, S. J., Van Der Weert, M., Blaauhut, V., & Van Lanen, H. A. J. (2020). Skill of large-scale seasonal drought impact forecasts. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(6), 1595–1608. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1595-2020>.
- Syaikhuddin, M. M., Anam, C., Rinaldi, A. R., & Conoras, M. E. B. (2018). Conventional software testing using white box method. *Kinetik: Game technology, information system, computer network, computing, electronics, and control*, 5(1), 65–72.
- Tim EWS SIPANTARA. (2023). *Peringatan dini dampak perubahan iklim hortikultura, aplikasi EWS beri peringatan dini mengenai perubahan iklim*. Ditjen Hortikultura. <https://ewssipantara.id/>

BAB XI

Pertanian Cerdas Iklim Menuju *Zero Emission*

Tania June, Yeli Sarvina

A. Urgensi Pertanian Cerdas Iklim

Perubahan iklim memberikan tantangan yang signifikan pada sektor pangan, termasuk terjadinya perubahan pola curah hujan, peningkatan frekuensi, dan tingkat keparahan kejadian cuaca ekstrem, dan perubahan suhu. Dalam bab sebelumnya telah dibahas model-model iklim dan perkembangannya, serta data-data iklim dikelola untuk dapat memberi dukungan pada berbagai kebijakan yang mengarah pada penguatan ketahanan pangan nasional. Dalam bab ini dibahas pertanian cerdas iklim sebagai salah satu upaya sektor pertanian untuk beradaptasi terhadap perubahan iklim yang terjadi, sekaligus menjadi strategi mitigasi perubahan iklim melalui penurunan emisi gas rumah kaca.

T. June, & Y. Sarvina

Institut Pertanian Bogor, *e-mail*: taniajune@apps.ipb.ac.id

© 2024 Editor & Penulis

June, T., & Sarvina, Y. (2024). Pertanian cerdas iklim menuju zero emission. Dalam D. E. Nuryanto & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (321–352). Penerbit BRIN.

DOI: 10.55981/brin.1244.c1395. E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

Pertanian cerdas iklim atau *climate smart agriculture* (CSA) adalah sebuah pendekatan untuk mencapai pembangunan pertanian berkelanjutan yang bertujuan untuk mengatasi tantangan dalam mencapai dan mempertahankan ketahanan pangan dengan bertambahnya jumlah penduduk, dalam menghadapi dampak perubahan iklim pada produktivitas pertanian. CSA juga bertujuan untuk menyusun strategi adaptasi yang tepat, serta bagaimana aktivitas pertanian dapat berkontribusi dalam mengatasi permasalahan meningkatnya gas rumah kaca (GRK) di atmosfer dan menetapkan langkah mitigasi yang dapat menurunkan emisi GRK dari praktik sistem pertanian.

Konsep CSA pertama kali diperkenalkan pada tahun 2010 oleh Organisasi Pangan dan Pertanian Perserikatan Bangsa-Bangsa (Food and Agriculture Organization of the United Nations) menyusul meningkatnya kekhawatiran tentang dampak perubahan iklim terhadap pencapaian dan keberlanjutan ketahanan pangan. Implementasi CSA mencakup tiga tujuan utama, yaitu (1) meningkatkan produktivitas dan pendapatan pertanian secara berkelanjutan, mencapai, dan meningkatkan ketahanan pangan serta mengurangi kemiskinan; (2) beradaptasi dan membangun ketahanan terhadap dampak perubahan iklim, untuk mempertahankan, dan meningkatkan ketahanan pangan dalam menghadapi perubahan pola cuaca, hama dan penyakit, serta tekanan lingkungan lainnya; dan (3) mengurangi dan/atau menghilangkan emisi gas rumah kaca dari aktivitas pertanian, mengurangi intensitas perubahan iklim, dan dampak negatif yang ditimbulkan. Secara sederhana, dua hal tersebut dapat diilustrasikan seperti Gambar 11.1.



Sumber: FAO (2010)

Gambar 11.1 Tiga Pilar CSA

Konsep CSA telah mendapatkan pengakuan yang makin meningkat selama dekade terakhir, karena dampak perubahan iklim terhadap pertanian makin besar. Pada tahun 2013, FAO menerbitkan panduan untuk CSA, yang memberikan kerangka kerja untuk implementasi praktik CSA di tingkat pertanian, lanskap, dan nasional. Sejak saat itu, FAO telah bekerja sama dengan negara-negara anggotanya dan para mitranya untuk mempromosikan penerapan praktik-praktik CSA di seluruh dunia, termasuk Indonesia. Hal ini termasuk mendukung pengembangan kebijakan dan strategi yang mempromosikan CSA, serta memberikan bantuan teknis kepada petani dan pemangku kepentingan lainnya untuk menerapkan praktik CSA di lapangan. FAO juga telah mengembangkan sejumlah alat dan sumber daya untuk mendukung implementasi CSA, termasuk buku panduan CSA, yang menyediakan panduan komprehensif tentang berbagai praktik dan pendekatan CSA yang dapat digunakan untuk mencapai tiga tujuan CSA tersebut.

B. CSA Menghasilkan Praktik Pertanian yang Resilien terhadap Dampak Perubahan Iklim

Menghadapi perubahan iklim dengan melakukan adaptasi merupakan hal yang sangat penting bagi sektor pertanian. Pertanian sangat bergantung pada kondisi iklim, termasuk suhu, pola curah hujan, dan panjang musim tanam. Perubahan iklim membawa perubahan yang signifikan pada faktor-faktor tersebut di atas, yang menyebabkan berbagai tantangan dan risiko bagi petani dan sistem produksi pangan. Dengan melakukan adaptasi praktik pertanian maka sektor pertanian memastikan dapat menjaga keberlanjutan dari ketahanan pangan nasional. Perubahan iklim dapat menyebabkan pergeseran hasil panen, perubahan pola hama dan penyakit, dan perubahan ketersediaan air. Dengan mengadaptasi teknik pertanian, varietas tanaman, dan sistem irigasi yang tepat, petani dapat mengatasi perubahan ini dengan lebih baik dan dapat mempertahankan produksi pangan dengan lebih stabil.

Pertanian merupakan sektor vital bagi Indonesia. Beradaptasi terhadap perubahan iklim membantu melindungi mata pencaharian petani dan menstabilkan ekonomi pedesaan, wilayah, dan negara. Dengan menerapkan praktik pertanian yang tangguh, melakukan diversifikasi tanaman, dan berinvestasi pada teknologi cerdas iklim, petani dapat mengurangi risiko ekonomi yang terkait dengan dampak perubahan iklim. Salah satu aspek yang sangat penting adalah pengelolaan air. Perubahan iklim memengaruhi ketersediaan air, yang menyebabkan perubahan pola curah hujan dan kelangkaan air di suatu wilayah. Pertanian adalah pengguna air yang utama, dan beradaptasi dengan perubahan iklim salah satunya melibatkan peningkatan praktik pengelolaan air. Hal ini mencakup penggunaan metode irigasi yang efisien, melakukan pemanenan air hujan terutama pada wilayah kering, dan infrastruktur penyimpanan air untuk mengurangi risiko kekurangan air dan kekeringan. June dan Sarvina (2023) menguraikan beberapa contoh dan penerapan CSA pada sistem pertanian Indonesia. Lebih lanjut, bagaimana evaluasi dampaknya pun disajikan baik secara kualitatif maupun kuantitatif.

Langkah-langkah adaptasi membantu mengurangi kerentanan sistem pertanian terhadap risiko terkait variabilitas iklim dan iklim ekstrem, seperti banjir, kekeringan, dan badai. Adaptasi terhadap perubahan iklim sejalan dengan prinsip-prinsip pembangunan berkelanjutan. Dengan mempromosikan praktik pertanian berkelanjutan, seperti pertanian organik, pertanian konservasi, dan agroekologi. Petani dapat mengurangi emisi gas rumah kaca, meningkatkan kesehatan tanah, dan mengurangi dampak lingkungan (sinergi antara adaptasi dan mitigasi). Pada dasarnya adaptasi terhadap perubahan iklim sangat penting bagi sektor pertanian untuk memastikan ketahanan pangan, stabilitas ekonomi, dan pembangunan berkelanjutan. Dengan memprioritaskan strategi adaptasi, pemerintah, petani, dan para pemangku kepentingan dapat bekerja sama untuk membangun sistem pertanian yang tangguh dan mampu menghadapi tantangan yang ditimbulkan oleh perubahan iklim.

Berikut adalah beberapa strategi adaptasi yang dapat digunakan untuk membantu sektor pangan beradaptasi dengan perubahan iklim.

1. Pembangunan dan Perbaikan Infrastruktur Pertanian dan Sistem Irigasi yang Baik

Memperbaiki infrastruktur yang dibutuhkan sektor pertanian, seperti jalan (*transportation*), fasilitas penyimpanan (*storage*), dan pasar, yang berguna untuk pergerakan barang dan mengurangi kerugian pasca-panen. Memperbaiki teknik pengelolaan air dan mempromosikan penggunaan sistem irigasi, termasuk koleksi, penyimpanan, dan distribusi untuk menjamin keberhasilan produksi tanaman dalam menghadapi perubahan pola curah hujan serta antisipasi bencana baik kelebihan maupun kekurangan air.

2. Diversifikasi Tanaman

Diversifikasi tanaman dipromosikan untuk meningkatkan ketahanan dan mengurangi ketergantungan pada satu jenis tanaman, mencakup pengenalan tanaman tahan terhadap kekeringan, rotasi tanaman, dan tumpang sari. Salah satu contoh program diversifikasi tanaman yang

sukses adalah program "Diversifikasi untuk Pertanian Berkelanjutan" yang dilaksanakan oleh International Rice Research Institute (IRRI) di wilayah Delta Mekong, Vietnam, dengan tujuan untuk diversifikasi sistem pertanian berbasis padi di wilayah tersebut untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan pertanian dalam menghadapi kondisi iklim yang berubah-ubah. Varietas tanaman baru dan teknik produksi diperkenalkan, termasuk penggunaan sayuran, buah-buahan, dan ternak, serta pengenalan tumpang sari dan rotasi tanaman serta dalam pelaksanaannya petani diberi pelatihan dan bantuan teknis untuk membantu mereka menerapkan praktik-praktik ini. Hasil yang didapat adalah peningkatan produktivitas pertanian, peningkatan kesehatan tanah, dan mengurangi ketergantungan pada monokultur padi.

3. Pengelolaan Tanah dan Lahan yang Berkelanjutan

Salah satu contoh sistem pertanian dengan pengelolaan tanah dan lahan berkelanjutan untuk adaptasi terhadap perubahan iklim adalah pertanian konservasi (*conservation agriculture*, CA). Pertanian konservasi (CA) dicirikan oleh praktik pertanian yang meminimalkan kerusakan terhadap tanah, menjaga tutupan tanah dengan menggunakan tanaman penutup (*cover crop*) atau menggunakan mulsa, serta menggalakkan sistem rotasi tanaman untuk meningkatkan kesehatan tanah dan mengurangi erosi, mengurangi degradasi tanah, dan lingkungan sambil mempertahankan produksi tanaman. CA melibatkan perubahan pada praktik pertanian konvensional serta pola pikir petani untuk mengatasi degradasi yang ditimbulkan dari penggunaan pengolahan tanah secara konvensional (Farooq & Siddique, 2015). Sistem CA membantu meningkatkan kesehatan tanah, meningkatkan kapasitas menahan air tanah, mengurangi erosi tanah, dan meningkatkan kesuburan tanah. Sistem ini diterapkan di banyak negara sebagai strategi adaptasi terhadap dampak variabilitas dan perubahan iklim (Uphoff, 2015; Govaerts et al., 2009; Derpsch et al. 2010; Hobbs et al., 2008; Verhulst et al., 2010).

Dercon et al. (2019) meneliti dampak dari CA terhadap penyerapan karbon tanah dan hasil panen di wilayah semiarid Andes Kolombia di Argentina. Studi ini menemukan bahwa CA meningkatkan penyimpanan karbon tanah sebesar 0,6–0,8 ton per hektare per tahun (40% peningkatan karbon organik tanah), meningkatkan kesuburan tanah, peningkatan hasil panen sebesar 30% dan membantu memitigasi perubahan iklim dengan mengurangi emisi gas rumah kaca. Contoh lain dari pengelolaan tanah yang berkelanjutan adalah pendekatan pengelolaan kesuburan tanah terpadu (*integrated soil fertility management*, ISFM), yang melibatkan integrasi berbagai praktik pengelolaan tanah seperti penggunaan pupuk organik dan anorganik, rotasi tanaman, tumpang sari, dan menerapkan sistem agroforestri/wanatani. Pendekatan ISFM bertujuan untuk meningkatkan kesuburan tanah, meningkatkan produktivitas tanaman, dan meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim (Dercon et al., 2019). Contoh lainnya adalah penggunaan biochar untuk memperbaiki kondisi tanah. Biochar adalah sejenis arang yang dihasilkan dari biomassa yang dapat ditambahkan ke dalam tanah untuk meningkatkan kesehatan dan kesuburan tanah. Mary et al. (2016) mengevaluasi penggunaan biochar untuk memperbaiki kondisi tanah dalam budi daya pertanian dan menemukan bahwa biochar merupakan media yang efektif untuk meningkatkan karbon tanah, efektivitas irigasi, mitigasi limpasan air (banjir), dan mengurangi polusi pertanian (emisi GRK). Selain itu, pengurangan limbah biomassa yang sangat banyak untuk menghasilkan biochar melalui proses pirolitik memberikan cara yang memungkinkan untuk menyelesaikan pengelolaan dan pembuangan limbah biomassa dengan cara yang efisien.

Pengolahan tanah konservasi juga mencakup memanfaatkan sisa-sisa tanaman yang tertinggal di permukaan tanah serta mengurangi frekuensi pengolahannya. Praktik ini membantu mengurangi erosi tanah dan meningkatkan kapasitas menahan air tanah. Rotasi tanaman dan penggunaan tanaman penutup (*cover crop*) juga merupakan bagian dari pengelolaan lahan yang berkelanjutan. Rotasi tanaman melibatkan penanaman tanaman yang berbeda secara berurutan

selama beberapa tahun. Praktik ini membantu memutus siklus hama dan penyakit, mengurangi erosi tanah, dan meningkatkan kesehatan tanah. Rotasi tanaman meningkatkan kesehatan tanah dengan meningkatkan bahan organik tanah, respirasi tanah, dan jumlah mikroba, sedangkan penggunaan tanaman penutup (*cover crop*) melibatkan penanaman tanaman tanpa nilai ekonomi di antara tanaman komersial untuk melindungi permukaan tanah dari erosi dan meningkatkan kesehatan tanah. Tanaman penutup tanah juga membantu meningkatkan kapasitas penyimpanan air tanah dan mengurangi pencucian unsur hara. Perbaikan tanah juga perlu dilakukan dengan melibatkan penambahan bahan organik atau anorganik ke dalam tanah untuk meningkatkan kesehatan dan kesuburan tanah. Penambahan bahan organik, seperti kompos dan pupuk kandang membantu meningkatkan bahan organik tanah, memperbaiki struktur tanah, dan meningkatkan kapasitas menahan air tanah. Perbaikan secara anorganik seperti penambahan kapur dan gypsum membantu mengatur pH tanah dan memperbaiki struktur tanah.

4. Membangun Sistem Peringatan Dini

Mengembangkan sistem peringatan dini diperlukan untuk kejadian cuaca ekstrem agar petani dapat mengambil tindakan yang tepat untuk melindungi tanaman dan lahan mereka. Sistem ini diperlukan untuk dapat memberikan pemberitahuan lebih awal kepada petani mengenai potensi risiko terkait cuaca, seperti kekeringan, banjir, angin topan, perubahan suhu yang ekstrem, potensi kebakaran dan serangan organisme pengganggu tanaman (OPT). Sistem peringatan dini dapat membantu petani membuat keputusan tepat waktu dan mengambil tindakan yang tepat untuk melindungi sistem pertanaman mereka, seperti menyesuaikan jadwal tanam, mengubah praktik irigasi, menyiapkan pengendalian potensi serangan OPT atau kejadian kebakaran serta kemungkinan harus memanen tanaman lebih awal. Tindakan-tindakan ini dapat membantu mengurangi dampak dari peristiwa cuaca dan kondisi ekstrem, mengurangi kehilangan hasil panen, dan meningkatkan ketahanan pangan (BMKG, 2015; Wardhana et al., 2019; Fitriani et al., 2018; Anggono et al., 2018).

Ada beberapa komponen yang termasuk dalam sistem peringatan dini yang efektif untuk menyiapkan petani kepada kejadian cuaca ekstrem, sebagai berikut.

1) Monitoring dan prakiraan

Hal ini termasuk pengumpulan data tentang pola cuaca, seperti suhu, curah hujan, dan kecepatan angin, serta menggunakan model untuk meramalkan kondisi cuaca pada masa depan, baik untuk jangka pendek, menengah, maupun panjang.

2) Komunikasi

Hal ini mencakup penyebaran informasi cuaca kepada petani secara tepat waktu dan mudah diakses, dapat dilakukan dengan menggunakan peringatan melalui telepon genggam, siaran radio, televisi, sosial media lainnya maupun melalui pertemuan komunitas untuk menjangkau petani.

3) Sistem pengambilan keputusan

Termasuk di dalamnya penyediaan informasi dan alat untuk membantu petani mengambil keputusan dalam menghadapi risiko cuaca buruk, mencakup penyediaan informasi mengenai varietas tanaman terbaik untuk ditanam di daerah yang rawan kekeringan atau potensi akan mengalami kelebihan air atau teknik irigasi yang paling efektif selama periode curah hujan yang tinggi.

Selain membantu petani melindungi tanaman mereka, sistem peringatan dini juga dapat membantu pemerintah dan organisasi bantuan untuk mempersiapkan dan merespons bencana yang berkaitan dengan cuaca. Dengan memberikan pemberitahuan lebih awal tentang potensi risiko, sistem ini dapat membantu meminimalkan dampak peristiwa cuaca ekstrem dan mengurangi kebutuhan akan penanganan darurat bencana yang mahal. Secara keseluruhan, mengembangkan sistem peringatan dini untuk kejadian cuaca ekstrem merupakan langkah penting untuk membangun ketahanan dalam sistem pertanian dan meningkatkan ketahanan pangan bagi masyarakat yang rentan terhadap risiko terkait iklim.

5. Pendidikan dan Awareness

Mendorong pendidikan dan kesadaran di kalangan petani dan pemangku kepentingan tentang dampak perubahan iklim dan strategi adaptasi yang perlu diterapkan. Mempromosikan pendidikan dan kesadaran di kalangan petani dan pemangku kepentingan tentang dampak perubahan iklim dan strategi adaptasi sangat penting untuk membangun ketahanan terhadap risiko kegagalan terkait iklim di sektor pertanian. Kegiatan yang dilakukan untuk meningkatkan kesadaran petani terhadap perubahan iklim dan bagaimana langkah adaptasinya adalah dengan sekolah lapang seperti sekolah lapangan iklim yang dikembangkan oleh BMKG melalui kerja sama dengan perguruan tinggi dan lembaga terkait. Di samping itu, Kementerian Pertanian juga telah mengembangkan Sekolah Lapangan Pengeloaan Tanaman Terpadu (SLPTT), Sekolah Lapang Pengendalian Hama Terpadu (SLPHTT), dan sekolah lapangan tematik lainnya.

Berikut adalah beberapa langkah untuk mempromosikan pendidikan dan *awareness*.

1) Mengidentifikasi masyarakat sasaran

Identifikasi target penerima manfaat dari program pendidikan dan penyadaran, seperti petani, penyuluh, pemasok input pertanian, pengolah lahan dan hasil panen, serta pembuat kebijakan. Tentukan kebutuhan dan preferensi informasi yang mereka perlukan.

2) Kembangkan materi pendidikan

Pengembangan materi edukasi yang disesuaikan dengan target penerima manfaat, seperti lembar fakta, brosur, video, panduan pelatihan, dan sumber daya daring (*online*). Materi tersebut harus mudah dipahami, sesuai dengan budaya, dan dapat diakses dengan mudah.

3) Melakukan pelatihan dan penyuluhan

Lakukan kegiatan pelatihan dan penyuluhan untuk menyebarluaskan materi edukasi dan meningkatkan kesadaran di antara khalayak sasaran. Kegiatan ini dapat berupa lokakarya, seminar, kunjungan lapangan, pertukaran petani dengan petani, dan kampanye melalui

media sosial. Berkolaborasi dengan mitra lokal, seperti penyuluh pertanian, LSM, dan lembaga penelitian untuk menjangkau masyarakat yang lebih luas.

4) Memberikan bantuan teknis

Memberikan bantuan teknis kepada petani dan pemangku kepentingan untuk menerapkan strategi adaptasi, seperti diversifikasi tanaman, konservasi tanah, manajemen irigasi, dan praktik pertanian yang tahan terhadap perubahan iklim. Hal ini dapat mencakup demonstrasi di lahan pertanian, pelatihan, dan pendampingan.

5) Memantau dan mengevaluasi

Pantau dan evaluasi efektivitas program pendidikan dan penyadaran untuk memastikan bahwa program tersebut memenuhi kebutuhan khalayak sasaran dan mencapai tujuannya. Gunakan umpan balik dari khalayak sasaran untuk menyempurnakan program dan melakukan perbaikan.

Poin-poin di atas memberikan wawasan tentang tantangan dan peluang untuk mempromosikan pendidikan dan *awareness* akan dampak perubahan iklim dan strategi adaptasi di kalangan petani dan pemangku kepentingan di Indonesia. Suryadi dan Marwati (2019), Pariwono et al. (2018), dan Badriyah et al. (2020) memberikan berbagai strategi adaptasi, yakni termasuk penggunaan informasi iklim, adopsi praktik pertanian yang tahan terhadap dampak perubahan iklim, serta peran jaringan sosial dalam penyebarluasan pengetahuan di Indonesia.

6. Pengurangan Risiko Bencana (*Disaster Risk Reduction*)

Mengembangkan rencana pengurangan risiko bencana untuk sektor pangan guna mengurangi dampak kejadian cuaca ekstrem, secara keseluruhan membutuhkan pendekatan multidisiplin dan kolaboratif yang melibatkan para pemangku kepentingan di seluruh rantai pasok pangan. Dengan menerapkan strategi yang efektif dan sistem peringatan dini, risiko dan kerentanan sektor pangan terhadap kejadian cuaca ekstrem dapat dikurangi dan ketahanan pangan bagi masyarakat dapat terjamin.

Mengembangkan rencana pengurangan risiko bencana untuk mengurangi dampak kejadian cuaca ekstrem pada sektor pangan, guna mengurangi dampak kejadian cuaca ekstrem, melibatkan beberapa langkah, sebagai berikut.

1) Menilai risiko

Identifikasi potensi kejadian cuaca ekstrem yang dapat berdampak pada sektor pangan di daerah pertanian, seperti banjir, kekeringan, angin kencang,x dan badai. Kaji kerentanan sektor pangan terhadap risiko-risiko ini, termasuk jenis tanaman, praktik pertanian, dan infrastruktur yang paling rentan.

2) Tetapkan prioritas

Tentukan area yang paling kritis yang perlu ditangani dalam rencana pengurangan risiko bencana, seperti melindungi tanaman pangan pokok, memastikan tersedianya akses ke irigasi atau sumber air lainnya, atau mengamankan infrastruktur penyimpanan dan transportasi hasil panen.

3) Menyusun strategi

Kembangkan strategi untuk mengurangi risiko dan kerentanan yang telah diidentifikasi dalam asesmen. Hal ini dapat mencakup langkah-langkah, seperti diversifikasi tanaman, praktik konservasi tanah, pemanenan air hujan, atau investasi di bidang infrastruktur yang tahan iklim.

4) Identifikasi pemangku kepentingan

Identifikasi pemangku kepentingan yang terlibat dalam sektor pangan, termasuk petani, pabrik pengolahan, distributor, dan konsumen. Libatkan mereka dalam proses perencanaan untuk memastikan bahwa strategi yang dikembangkan praktis dan efektif.

5) Membangun sistem pemantauan dan peringatan dini

Membangun sistem pemantauan dan peringatan dini yang dapat memberikan informasi yang tepat waktu dan akurat tentang risiko terkait cuaca. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan alat pemantau cuaca, seperti satelit atau stasiun cuaca, atau bekerja

sama dengan peneliti dan universitas untuk mengembangkan sistem peringatan dini berbasis masyarakat.

6) Membangun kapasitas

Membangun kapasitas di antara para pemangku kepentingan untuk mengimplementasikan rencana pengurangan risiko bencana. Hal ini dapat dilakukan dengan memberikan pelatihan mengenai praktik-praktik pertanian yang tahan terhadap perubahan iklim, atau membangun kemitraan dengan organisasi-organisasi yang dapat memberikan bantuan dan dukungan teknis.

7) Evaluasi dan perbaikan

Mengevaluasi efektivitas rencana pengurangan risiko bencana secara berkala dan merevisinya sesuai kebutuhan untuk memastikan bahwa rencana tersebut tetap relevan dan efektif.

Pengembangan rencana pengurangan risiko bencana (*disaster risk reduction*) di Indonesia, yang memberikan informasi mengenai strategi nasional dan rencana-rencana khusus sektoral, mencakup berbagai bencana, termasuk banjir, gempa bumi, tanah longsor, dan risiko-risiko lain yang berhubungan dengan iklim telah dibuat untuk memberikan wawasan tentang tantangan dan peluang untuk pengurangan risiko bencana di Indonesia, termasuk pendekatan berbasis masyarakat, peningkatan kapasitas, dan sistem peringatan dini (BNPB, 2018; Ministry of Agriculture, 2017; IFRC, 2019, UNDP, 2018).

7. Penelitian dan Inovasi

Penelitian dan inovasi perlu didukung untuk mengembangkan variasitas tanaman baru, pengembangan teknologi praktis spesifik lokasi, model prakiraan cuaca, dan praktik-praktik yang lebih baik untuk beradaptasi dengan perubahan kondisi iklim. Perlu dilakukan kerja sama terus-menerus antara universitas (khususnya yang terbaik di sektor pertanian) dengan BRIN, BMKG, serta kelembagaan penelitian lainnya baik di tingkat nasional maupun internasional, petani, penyuluh, pemerintah lokal dan nasional untuk membangun sistem pertanian yang tangguh dalam menghadapi perubahan iklim.

C. Kearifan Lokal Indonesia untuk Adaptasi terhadap Perubahan Iklim

Praktik-praktik kearifan lokal Indonesia dalam adaptasi terhadap perubahan iklim merupakan sumber pengetahuan dan inspirasi yang berharga untuk pertanian berkelanjutan di era perubahan iklim. Indonesia memiliki warisan pertanian yang kaya dan sejarah panjang dalam beradaptasi dengan perubahan kondisi lingkungan. Kearifan lokal tersebut bila dikaji lebih mendalam merupakan bentuk praktik-praktik dari CSA, tetapi belum dilaksanakan secara serius karena berbagai keterbatasan, seperti permodalan dan kelembagaan karena itu diperlukan kajian dan penelitian bagaimana pengembangan praktik-praktik CSA tersebut yang menyesuaikan dengan kondisi lokal. Lipper et al. (2014) menyebutkan bahwa CSA bukanlah teknologi baru tapi merupakan sebuah pendekatan dalam memadukan teknologi yang ada dan memperhatikan semua indikator CSA. Bai et al. (2019) menyebutkan bahwa dalam implementasi CSA sangat penting untuk mempertimbangkan kondisi lokal seperti kondisi iklim, tanah, dan manajemen usaha tani serta kondisi sosial ekonomi dan budaya lokal. Praktik-praktik CSA yang digali dari kearifan lokal akan lebih mudah untuk diadopsi dan dikembangkan.

Adapun beberapa praktik kearifan lokal di Indonesia yang biasa dilakukan dan dapat dikategorikan dalam praktik CSA yang dapat digunakan untuk adaptasi perubahan iklim, antara lain

1) Agroforestri/wanatani

Merupakan sistem pertanian yang melibatkan penanaman pohon dan tanaman pangan, atau melibatkan ternak secara bersamaan dengan cara yang saling menguntungkan. Praktik ini memberikan banyak manfaat, seperti penyerapan karbon yang lebih tinggi per satuan luas lahan dan meningkatkan kesuburan, memberikan naungan, konservasi tanah dan mengurasi erosi tanah, serta konservasi keanekaragaman hayati (Hairiah et al., 2010; Mardiastuti & Nurrochmat, 2019; Roshetko et al., 2014). Melalui praktik agroforestri, petani dapat mengurangi risiko gagal panen akibat cuaca ekstrem, seperti angin

kencang, kekeringan, atau banjir. Di Indonesia, sistem wanatani telah digunakan selama berabad-abad, dengan berbagai kombinasi pohon dan tanaman tergantung pada kondisi dan kebutuhan setempat. Salah satu sistem wanatani yang sukses di Indonesia adalah kebun campuran (*mixed garden*), yang melibatkan penanaman pohon buah-buahan, sayuran, dan rempah-rempah secara bersamaan di sebidang tanah yang sama. Sistem ini umum dilakukan di banyak daerah di Indonesia, terutama di Jawa, dan dikenal karena kemampuannya untuk menghasilkan volume panen yang lebih tinggi per satuan luas lahan dengan menggunakan sumber daya yang terbatas. Sistem kebun campuran telah terbukti memiliki beberapa manfaat, termasuk meningkatkan kesuburan tanah, meningkatkan keanekaragaman hayati, dan meningkatkan ketahanan pangan. Penelitian juga menunjukkan bahwa kebun campuran dapat menjadi sumber pendapatan yang signifikan bagi petani skala kecil, terutama jika digabungkan dengan kegiatan bernilai tambah seperti pengolahan dan pemasaran produk.

Sistem wanatani lain yang berhasil di Indonesia adalah sistem tumpang sari, yang melibatkan tumpang sari tanaman tahunan dengan tanaman keras seperti pohon buah-buahan atau pohon kayu. Sistem ini umumnya digunakan di perkebunan kopi di Sumatra dan telah terbukti meningkatkan kesuburan tanah, mengurangi serangan hama dan penyakit, dan meningkatkan hasil panen secara keseluruhan. Seperti yang dilaporkan Sarvina et al. (2022), petani kopi robusta di Lampung Barat telah secara turun-temurun melakukan praktik wanatani dengan beberapa varietas tanaman, seperti dengan tanaman pohon lindung, tanaman hortikultura (cabai dan pisang), dan tanaman perkebunan lainnya, seperti lada.

Selain manfaat bagi petani, sistem wanatani di Indonesia juga memiliki manfaat bagi lingkungan, seperti mitigasi perubahan iklim melalui penyerapan karbon dan mengurangi deforestasi dan degradasi lahan (sinergi adaptasi dengan mitigasi). Hal ini juga dibuktikan oleh penelitian Sarvina et al. (2022). Dari model simulasi dengan menggunakan model terbukti bahwa wanatani kopi dengan berbagai macam tanaman mampu meningkatkan produktivitas dan penda-

patan, efisiensi pemanfaatan air dan lahan serta mampu mengikat karbon paling tinggi.

2) Budi daya padi-ikan (mina padi)

Mina padi-ikan adalah sistem pertanian tradisional di Indonesia yang melibatkan penanaman padi dan ikan di lahan yang sama. Praktik ini dapat membantu petani beradaptasi terhadap perubahan iklim dengan menyediakan sumber pendapatan tambahan dan mengurangi risiko gagal panen akibat banjir atau kekeringan. Ikan juga dapat membantu mengendalikan hama dan gulma, sehingga mengurangi kebutuhan pestisida dan herbisida.

3) Pengelolaan air

Indonesia memiliki pengalaman sangat baik dalam praktik pengelolaan air yang dapat digunakan untuk beradaptasi dengan perubahan iklim. Sebagai contoh, petani di Bali menggunakan sistem saluran irigasi dan terasering untuk menghemat air dan mencegah erosi tanah (sistem subak). Dengan mengadopsi praktik-praktik ini, petani dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air dan mengurangi risiko gagal panen akibat kekeringan.

4) Varietas tanaman tradisional

Indonesia memiliki keanekaragaman varietas tanaman tradisional yang beradaptasi dengan baik terhadap kondisi lingkungan setempat. Varietas tanaman ini telah berevolusi selama berabad-abad untuk mengatasi kondisi iklim setempat, seperti kekeringan, banjir, atau hama dan penyakit. Dengan melestarikan dan membudidayakan varietas tanaman tradisional, petani dapat beradaptasi dengan perubahan kondisi iklim dan mempertahankan warisan pertanian mereka. Budi daya berbagai jenis tanaman tradisional di dalam satu lahan, diversifikasi tanaman, merupakan aktivitas pertanian yang biasa dilakukan di perdesaan di Indonesia yang bertujuan untuk meningkatkan produktivitas, mengurangi risiko hama dan penyakit, serta meningkatkan kesehatan tanah. Di Indonesia, diversifikasi tanaman telah digunakan untuk mengurangi ketergantungan pada satu jenis tanaman dan meningkatkan ketahanan pangan (Gafur et al., 2017).

5) Pengendalian hama terpadu (PHT)

PHT adalah sebuah pendekatan pengendalian hama yang menggabungkan metode biologi, budi daya, dan kimiawi untuk meminimalisasi penggunaan pestisida sekaligus mempertahankan produktivitas tanaman. Di Indonesia, PHT telah berhasil diterapkan pada budi daya padi, mengurangi penggunaan pestisida hingga 50% dan meningkatkan hasil panen 10%–30% (Settle et al., 1996). Secara tradisional petani di beberapa daerah juga telah mengaplikasi pestisida nabati yang dibuat sendiri.

6) Pengelolaan sumber daya alam berbasis masyarakat

Di banyak komunitas perdesaan di Indonesia, sumber daya alam seperti hutan, sumber air, dan perikanan dikelola secara kolektif oleh masyarakat setempat. Praktik ini membantu melestarikan sumber daya alam dan mempertahankan mata pencarian masyarakat se-tempat. Dengan mengadopsi praktik pengelolaan sumber daya alam berbasis masyarakat, petani dapat beradaptasi dengan perubahan kondisi iklim dan mengurangi risiko gagal panen akibat penipisan sumber daya alam.

D. CSA Merupakan Praktik Pertanian Menuju *Zero Emission*

Selain adaptasi, tujuan utama penerapan pertanian cerdas iklim adalah mengurangi atau menghilangkan emisi gas rumah kaca dari praktik pertanian untuk mitigasi perubahan iklim akibat meningkatnya GRK di atmosfer, dengan menggunakan teknologi yang tersedia, murah, dan mudah dilakukan. Beberapa cara yang dapat dilakukan untuk mencapai target *zero emission* pada praktik pertanian, di antaranya sebagai berikut.

1) Mengurangi pengolahan tanah (*minimum tillage*)

Sistem pengolahan tanah yang minimum dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dengan mengurangi jumlah gangguan pada tanah dan mengurangi kehilangan karbon dari permukaan

tanah. Pendekatan ini juga dapat meningkatkan kesehatan tanah, retensi air, dan ketersediaan nutrisi.

2) Pertanian presisi (*precision farming*)

Teknologi pertanian presisi dapat membantu mengoptimalkan input produksi tanaman, mengurangi limbah, dan meningkatkan hasil panen sehingga secara keseluruhan dapat mengurangi emisi GRK per unit makanan yang dihasilkan.

3) Wanatani/agroforestri

Wanatani melibatkan integrasi pohon dengan tanaman dan/atau ternak. Pendekatan ini dapat menyerap karbon di pohon dan tanah, mengurangi erosi, dan memberikan manfaat lingkungan lainnya.

4) Pengelolaan ternak

Ternak merupakan sumber emisi gas rumah kaca yang signifikan, terutama metana. Perbaikan dalam pengelolaan ternak, termasuk perubahan dalam praktik pemberian pakan dan pengembangbiakan, dapat membantu mengurangi emisi ini.

5) Penggunaan energi terbarukan

Penggunaan sumber energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan bioenergi dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dari lahan dan wilayah pertanian.

6) Penggunaan lahan yang berkelanjutan

Praktik-praktik penggunaan lahan yang berkelanjutan seperti pertanian konservasi dan rotasi tanaman dapat membantu mengurangi erosi tanah, meningkatkan kesehatan tanah, dan menyerap karbon lebih besar.

Dengan mengadopsi praktik-praktik ini dan praktik-praktik pertanian cerdas iklim lainnya, kita dapat bergerak menuju pertanian tanpa emisi sambil mempertahankan ketahanan pangan dan mempromosikan pembangunan berkelanjutan.

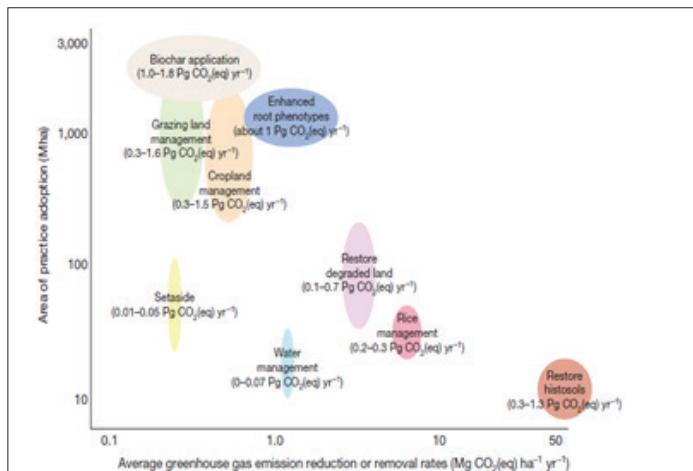
E. Pengurangan Pengolahan Tanah (*Reduced Tillage*)

Pengurangan pengolahan tanah (*reduced tillage*) merupakan komponen kunci dari pertanian cerdas iklim (CSA) karena dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK), meningkatkan kesehatan tanah, dan meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim. Pengolahan tanah adalah proses penyiapan tanah untuk penanaman dengan cara mengolah permukaan tanah dan mencampurkan bahan organik ke dalam lapisan tanah. Namun, pengolahan tanah yang berlebihan dapat menyebabkan degradasi tanah, erosi, dan hilangnya bahan organik, yang dapat mengurangi kesuburan dan produktivitas tanah. Sebaliknya, pengolahan tanah yang minimum dengan mengurangi jumlah gangguan tanah selama persiapan lahan dan penanaman, sambil mempertahankan tutupan tanah dan melestarikan bahan organik tanah. Hal ini dapat dicapai melalui berbagai metode, seperti menggunakan peralatan tanpa pengolahan tanah (*no-tillage*) atau pengolahan tanah minimum (*minimum tillage*), menggunakan tanaman penutup (*cover crop*), melakukan rotasi tanaman, dan tumpang sari.

Dengan mengurangi gangguan pada tanah, pengolahan tanah minimum dapat membantu melestarikan struktur tanah dan mengurangi hilangnya bahan organik, yang dapat meningkatkan kesehatan dan kesuburan tanah. Hal ini juga dapat mengurangi jumlah energi yang dibutuhkan untuk persiapan lahan, serta emisi gas rumah kaca seperti karbon dioksida dan nitrogen oksida, yang terkait dengan pengolahan tanah. Selain manfaat terhadap lingkungan, pengurangan pengolahan tanah juga dapat memberikan manfaat ekonomi bagi petani, seperti berkurangnya biaya tenaga kerja dan mesin, hasil panen yang lebih baik, dan peningkatan ketahanan terhadap variabilitas cuaca dan perubahan iklim.

FAO mempromosikan pengurangan pengolahan tanah sebagai praktik utama dalam CSA, dan memberikan bantuan teknis kepada petani dan pemangku kepentingan lainnya untuk menerapkan praktik pengolahan tanah yang lebih sedikit. FAO juga mendukung

pengembangan kebijakan dan strategi yang mempromosikan pengurangan pengolahan tanah dan praktik CSA lainnya, sebagai bagian dari mandatnya yang lebih luas untuk mempromosikan pertanian dan sistem pangan berkelanjutan. Beberapa praktik pengolahan tanah dan kemampuan dalam pengurangan emisi ditunjukkan oleh Gambar 11.2.



Sumber: Paustian et al. (2016)

Gambar 11.2 Teknologi dan Potensi Rata-Rata Pengurangan Emisi

F. Pertanian Presisi (*Precision Farming*)

Pertanian presisi adalah suatu bentuk pertanian yang menggunakan teknologi untuk mengoptimalkan produksi pertanian sekaligus mengurangi limbah dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Di sisi lain, pertanian cerdas iklim berfokus pada praktik pertanian berkelanjutan yang tahan terhadap perubahan iklim dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Dengan menggabungkan pertanian presisi dengan pertanian cerdas iklim, petani dapat mencapai sistem pertanian tanpa emisi yang memaksimalkan hasil panen sekaligus meminimalkan dampak lingkungan. Beberapa praktik dan teknologi

utama yang dapat digunakan dalam pertanian presisi untuk mencapai nol emisi dalam pertanian cerdas iklim meliputi sebagai berikut.

- 1) Mengurangi pengolahan tanah: praktik pengolahan tanah konvensional dapat melepaskan karbon yang tersimpan di dalam tanah dan berkontribusi terhadap emisi GRK. Teknik pertanian presisi seperti tanpa pengolahan tanah atau mengurangi pengolahan tanah dapat meminimalkan gangguan pada tanah dan mengurangi emisi karbon.
- 2) Irigasi presisi: praktik irigasi tradisional bisa jadi boros air dan boros energi, yang menyebabkan emisi GRK dari penggunaan energi dan pemompaan air. Pertanian presisi dapat mengoptimalkan irigasi, menggunakan sensor dan data untuk menentukan kapan dan berapa banyak air yang dibutuhkan, sehingga mengurangi penggunaan energi dan emisi GRK. Dengan menggunakan sensor dan analisis data, petani dapat mengoptimalkan jumlah air yang digunakan dalam irigasi untuk mengurangi pemborosan air dan konsumsi energi.
- 3) Pemupukan presisi: penggunaan pupuk nitrogen yang berlebihan dapat menyebabkan emisi dinitrogen oksida, salah satu gas rumah kaca yang kuat. Pertanian presisi dapat membantu petani menerapkan jumlah nutrisi yang tepat berdasarkan kondisi tanah dan kebutuhan tanaman sehingga mengurangi penggunaan pupuk dan emisi terkait. Dengan menggunakan sensor tanah dan analitik data, petani dapat menentukan jumlah pupuk yang tepat yang dibutuhkan untuk setiap tanaman, mengurangi penggunaan pupuk yang berlebihan, dan meminimalkan limpasan hara ke saluran air.
- 4) Rotasi tanaman: dengan merotasi tanaman, petani dapat mengurangi erosi tanah, meningkatkan kesehatan tanah, dan mengurangi kebutuhan akan input kimia.
- 5) Tanaman penutup (*cover crop*): menanam tanaman penutup tanah dapat membantu mencegah erosi tanah, mengurangi limpasan hara, dan meningkatkan kesehatan tanah.

- 6) Pengelolaan hama terpadu: praktik pengelolaan hama tradisional, seperti penyemprotan pestisida, dapat berkontribusi terhadap emisi GRK. Pertanian presisi dapat membantu petani menggunakan kombinasi teknik, termasuk kontrol biologis dan rotasi tanaman, untuk mengurangi penggunaan pestisida dan emisi terkait. Dengan menggunakan kombinasi metode pengendalian hama, termasuk pengendalian biologis dan rotasi tanaman, petani dapat mengurangi penggunaan pestisida kimia, yang dapat berdampak negatif terhadap lingkungan.
- 7) Energi terbarukan: dengan menggunakan sumber energi terbarukan, seperti panel surya, tenaga air atau turbin angin untuk menjalankan operasi pertanian, petani dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dari penggunaan bahan bakar fosil dan menghemat biaya energi.

Besarnya penurunan emisi dengan pengolahan tanah melalui praktik CSA disampaikan oleh Paustian et al. (2016). Irigasi presisi, misalnya dengan penerapan *intemitten* (irigasi terputus) pada budi daya padi di lahan irigasi, mampu menghemat penggunaan air dan mampu menurunkan emisi. Sistem irigasi terputus ini dapat menurunkan emisi CH₄ sebesar 33,18% dan potensi pengurangan GRK global 34,9% (Utaminingsih & Hidayah, 2012). Pemupukan yang presisi seperti dengan pendekatan *variable rate fertilizer* mampu menurunkan emisi dibandingkan sistem pemupukan konvensional (Jovarauskas et al., 2021). Rotasi pertanaman yang tepat dapat meningkatkan kandungan organik tanah dan menurunkan emisi (Yang et al., 2022). Namun, diperlukan berbagai kajian untuk menemukan pola rotasi pertanaman yang sesuai untuk setiap wilayah. Dampak pengurangan emisi pada penggunaan *cover crop* pada budi daya pertanian telah dilaporkan oleh berbagai penelitiannya (Quintarelli et al., 2022; Zhang et al., 2024).

Dengan menerapkan teknik pertanian presisi di atas, petani dapat mengoptimalkan praktik pertanian mereka, mengurangi limbah dan meningkatkan efisiensi, sekaligus mengurangi emisi gas rumah

kaca. Hal ini dapat berkontribusi pada sistem pertanian yang lebih berkelanjutan dan tahan terhadap perubahan iklim.

Pertanian presisi melibatkan penggunaan teknologi dan data (iklim, tanaman, tanah, input produksi, pertumbuhan dan perkembangan tanaman, tenaga kerja, dan pasar) untuk mengoptimalkan praktik pertanian dan meningkatkan efisiensi dan keuntungan petani. Berikut adalah beberapa langkah untuk mencapai pertanian presisi.

1) Koleksi data

Petani dapat menggunakan sensor, *drone* (pesawat tanpa awak), satelit, kamera, dan pengamatan langsung untuk mengumpulkan data tentang kondisi tanah, pola cuaca, pertumbuhan tanaman, organisme pengganggu tanaman, produksi, termasuk data untuk informasi harga dan permintaan terhadap produk. Data ini dapat digunakan untuk membuat keputusan yang tepat tentang kapan dan bagaimana menanam, mengairi, memupuk, penanganan OPT, memanen tanaman, penyimpanan/*storage*, dan distribusi.

2) Analisis data

Petani dapat menggunakan perangkat lunak dan alat analisis untuk menganalisis data yang mereka kumpulkan, mengidentifikasi pola dan tren yang dapat menginformasikan keputusan tentang praktik pertanian, pemanenan, penyimpanan, dan distribusi.

3) Menciptakan zona manajemen

Petani dapat menggunakan data yang mereka kumpulkan untuk membuat zona pengelolaan, yang merupakan area pertanian dengan kondisi tanah, air, dan kondisi lainnya yang serupa. Zona-zona ini dapat digunakan untuk mengoptimalkan penanaman, pemupukan, dan praktik-praktik lainnya, yang disesuaikan dengan kebutuhan spesifik setiap zona.

4) Gunakan peralatan presisi

Pertanian presisi membutuhkan peralatan khusus, seperti traktor, penanam, dan penyemprot yang dipandu GPS untuk menerapkan

input dengan akurat dan efisien. Alat-alat ini dapat membantu petani mengurangi limbah, menghemat waktu dan tenaga kerja, serta meningkatkan hasil panen.

5) Membuat keputusan yang tepat

Dengan menggunakan data dan alat analisis, petani dapat membuat keputusan yang tepat tentang praktik pertanian, mengoptimalkan input dan mengurangi limbah, serta pemasaran yang tepat sasaran. Hal ini dapat membantu meningkatkan efisiensi, mengurangi biaya, dan meningkatkan hasil panen dan keuntungan.

6) Monitoring dan penyesuaian secara terus-menerus

Pertanian presisi adalah proses berkelanjutan yang membutuhkan pemantauan dan penyesuaian terus menerus. Petani dapat menggunakan sensor (iklim, tanah, tanaman), drone, dan teknologi lainnya, termasuk *internet of thing* (IoT) untuk memantau pertumbuhan dan kondisi tanaman, menyesuaikan input yang diperlukan untuk mengoptimalkan hasil panen, penyimpanan, dan distribusi yang tepat serta mengurangi limbah.

G. Penghitungan Emisi dari Aktivitas Pertanian

Menghitung apakah suatu kegiatan pertanian dapat menurunkan emisi atau menghasilkan emisi GRK nol dapat menjadi proses yang rumit karena memerlukan kuantifikasi dan pertimbangan semua input dan output yang terkait dengan kegiatan tersebut, atau dengan kata lain perlu dilakukan *life cycle assessment* (LCA) dari kegiatan sistem pertanian dari hulu-hilir sehingga memudahkan dalam pengambilan keputusan intervensi yang diperlukan. Berikut adalah beberapa langkah yang dapat dilakukan untuk kuantifikasi atau memperkirakan emisi GRK dari kegiatan pertanian.

1) Mengidentifikasi semua *input*

Langkah pertama adalah mengidentifikasi semua input yang terkait dengan kegiatan pertanian, termasuk penggunaan energi, penggunaan pupuk, penggunaan air, transportasi, dan *input* lainnya.

2) Hitung emisi yang terkait dengan *input*

Setelah semua *input* diidentifikasi, langkah selanjutnya adalah menghitung emisi yang terkait dengan setiap *input*. Sebagai contoh, emisi yang terkait dengan penggunaan energi dapat dihitung berdasarkan jenis dan jumlah energi yang digunakan serta faktor emisi untuk jenis energi tersebut.

3) Mengidentifikasi semua keluaran

Langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi semua keluaran yang terkait dengan kegiatan pertanian, termasuk hasil panen, limbah, dan emisi yang dilepaskan dari tanah, air atau sumber lainnya.

4) Hitung emisi yang terkait dengan keluaran

Setelah semua keluaran diidentifikasi, langkah selanjutnya adalah menghitung emisi yang terkait dengan setiap keluaran. Sebagai contoh, emisi yang terkait dengan limbah dapat dihitung berdasarkan jenis dan jumlah limbah serta faktor emisi untuk jenis limbah tersebut.

5) Membandingkan *input* dan *output*

Langkah terakhir adalah membandingkan emisi yang terkait dengan *input* dan *output*. Jika emisi yang terkait dengan *input* sama dengan atau kurang dari emisi yang terkait dengan *output* maka kegiatan budi daya dapat dianggap menghasilkan emisi nol.

Penting untuk dicatat bahwa menghitung emisi yang terkait dengan kegiatan pertanian dapat menjadi rumit dan memerlukan keahlian khusus. Terdapat banyak faktor yang dapat memengaruhi emisi, termasuk pola cuaca, kondisi tanah, jenis, umur tanaman, dan pola pengelolaan lahan pertanian. Oleh karena itu, penting untuk berkonsultasi dengan para ahli dan menggunakan alat dan metodologi yang tepat untuk menghitung emisi secara akurat dan menentukan apakah suatu kegiatan pertanian berhasil mencapai *zero emission*.

H. Contoh Praktik CSA: Sistem Produksi Kopi di Kabupaten Lampung Barat

Lampung Barat merupakan salah satu sentra kopi robusta nasional Indonesia. Secara ekonomi, perkebunan kopi berperan penting dalam pengembangan ekonomi wilayah Kabupaten Lampung Barat dengan PDRB 24,82% (Balitbangda Lampung Barat, 2018). Produktivitas kopi di wilayah ini sangat dipengaruhi variabilitas iklim (Sarvina et al., 2021) dan pada masa yang akan datang kesesuaian iklim untuk tanaman kopi diproyeksikan akan terus menurun sebagai dampak dari perubahan iklim (Sarvina et al., 2022b). Untuk keberlanjutan sistem produksi di Lampung Barat maka praktik-praktik CSA harus dikembangkan. Secara umum petani di Kabupaten Lampung Barat telah mempraktikkan teknologi CSA, tetapi belum dilaksanakan dengan manajemen yang baik dan belum pernah dilakukan kuantifikasi teknologi tersebut.



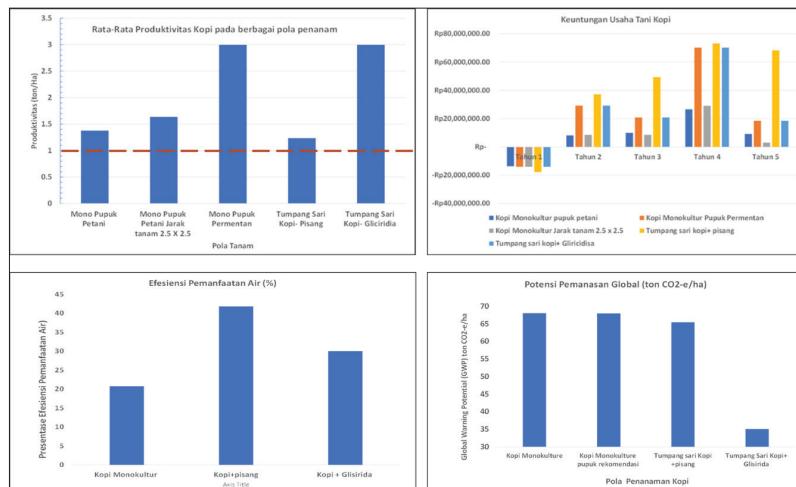
Foto: Tania June dan Yeli Sarvina (2022)

Gambar 11.3 Sistem Tumpang Sari Kopi dan Pisang di Lampung Barat

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Salah satu praktik CSA yang diangkat dalam studi kasus ini adalah sistem tumpang sari kopi dan pisang serta kopi dan tanaman pohon. Praktik ini telah banyak dilakukan petani kopi terutama semenjak La Niña 2010 di mana pada saat ini produksi kopi sangat anjlok sehingga untuk meningkatkan kapasitas petanian maka dilakukan tumpang sari kopi dan pisang. Dampak dari praktik ini dilihat dari tiga pilar CSA, yaitu pilar pertama produktivitas dilihat dari produksi dan keuntungan usaha tani, pilar adaptasi dan ketahanan dilihat dari efisiensi pemanfaatan air dan lahan, dan pada pilar mitigasi adalah net emisi.

Dari Gambar 11.4 terlihat bahwa sistem tumpang sari kopi dan pisang memberikan dampak lebih baik pada semua pilar CSA dibandingkan penanaman kopi dengan sistem konvensional (monokultur). Kajian ini menunjukkan bahwa CSA bukanlah teknologi baru. CSA dapat diangkat dari nilai lokal dan kearifan lokal, tetapi perlu diangkat dan dikembangkan dengan sistem manajemen yang lebih baik.



Sumber: Sarvina et al. (2022a)

Gambar 11.4 Indikator CSA pada Setiap Pilar CSA

I. Penutup

Indonesia telah menetapkan tujuan-tujuan yang ambisius untuk keberlanjutan yang berkaitan dengan produksi dan konsumsi makanan, air, dan energi. Tujuan-tujuan ini akan dicapai dengan mendukung pemberdayaan dan peningkatan kapasitas, peningkatan penyediaan layanan dasar di bidang kesehatan, serta mitigasi dan adaptasi yang komprehensif dan strategi pengurangan risiko bencana (UNFCCC, 2022). Adaptasi perubahan iklim di Indonesia sebagian besar akan berfokus pada pencegahan banjir dan kekeringan, serta ketahanan pangan dan sumber daya air. Beberapa strategi adaptasi yang akan sangat bermanfaat bagi Indonesia termasuk penguatan infrastruktur untuk meningkatkan ketahanan dan kekuatan ketika menghadapi banjir atau kekeringan, pembentukan sistem peringatan dini, praktik pertanian yang berkelanjutan dan adaptif, serta asuransi bencana. Strategi penting lainnya adalah pencegahan perubahan iklim, yang berfokus pada pentingnya mengurangi emisi, dan dengan demikian mengurangi tingkat keparahan perubahan iklim pada masa depan (UNEP, 2018). Beberapa strategi adaptasi yang akan sangat bermanfaat bagi Indonesia antara lain penguatan infrastruktur untuk meningkatkan ketahanan dan kekokohan saat menghadapi banjir atau kekeringan, pembentukan sistem peringatan dini, praktik pertanian yang berkelanjutan dan adaptif, serta asuransi bencana (UNEP, 2018).

Untuk memitigasi emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian, Indonesia dapat mempromosikan penggunaan sumber energi terbarukan, seperti energi matahari dan angin, mengurangi penggunaan pupuk dan pestisida sintetis, dan mendorong adopsi praktik-praktik pertanian yang cerdas iklim, seperti wanatani/agroforestri, pertanian konservasi, dan rotasi tanaman (OECD, 2018).

Praktik pertanian berkelanjutan melalui pertanian cerdas iklim adalah praktik pertanian yang menjaga atau meningkatkan kesehatan tanah, melestarikan sumber daya alam, mengurangi (*menuju zero emission*) emisi gas rumah kaca, dan meningkatkan keanekaragaman hayati sambil memastikan keberlangsungan ekonomi dan kesejahteraan sosial. Dengan menerapkan strategi-strategi tersebut, sektor

pangan dapat meningkatkan ketahanannya terhadap perubahan iklim dan terus menyediakan ketahanan pangan bagi masyarakat dan secara bersamaan memberikan kontribusi terhadap penurunan GRK dari sektor pertanian.

Referensi

- Anggono, T., Kusumadewi, S., & Utomo, P. (2018). A review of disaster early warning system in Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1025(1), 012017.
- Badriyah, N., Ismoyo, H. W., & Nurhayati, A. (2020). Assessment of farmers' perception and adaptation to climate change in rice farming. *Journal of Physics: Conference Series*, 1463(1), 012039
- Bai, X., Huang, Y., Ren, W., Coyne, M., Jacinthe, P., Tao, B., Hui, D., Yang, J., & Matocha, C. (2019). Responses of soil carbon sequestration to climate-smart agriculture practices: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 25(8), 2591–2606. <https://doi.org/10.1111/gcb.14658>
- Bai, X., Huang, Y., Ren, W., Coyne, M., Jacinthe, P. A., Tao, B., Hui, D., Yang, J., & Matocha, C. (2019). Responses of soil carbon sequestration to climate-smart agriculture practices: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 25(8), 2591–2606. <https://doi.org/10.1111/gcb.14658>.
- Balitbangda Lampung Barat. (2018). *Kajian komoditas unggulan kecamatan se Kabupaten Lampung Barat*. Badan Penelitian dan Pengembangan Daerah Lampung Barat.
- BMKG. (2015). *Early warning system: strategy and plan of action for disaster risk reduction in Indonesia*.
- BNPB. (2018). *National disaster risk reduction strategy*.
- Dercon, G., Tittonell, P., Wijk, M. T. V., Klapwijk, C. J., Baltenweck, I., & Zingore, S. (2019). Conservation agriculture in the Colombian Andes: Long-term effects on soil carbon stocks and crop yields. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 279, 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.04.027>
- Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A., & Li, H. (2010). Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3(1), 1–25.

- Farooq, M., & Siddique, K. (2015). Conservation agriculture: Concepts, brief history, and impacts on agricultural systems. Dalam M. Farooq & K. Siddique (Ed.), *Conservation agriculture* (1–17). Springer.
- Fitriani, R. A., Putri, A. S., & Yusuf, M. (2018). Early warning system for flash flood in Indonesia. *Dalam IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 175, Artikel 012088). IOP Publishing.
- Govaerts, B., Verhulst, N., Castellanos-Navarrete, A., Sayre, K. D., Dixon, J., & Dendooven, L. (2009). Conservation agriculture and soil carbon sequestration: Between myth and farmer reality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(2), 97–122.
- Hairiah, K., Dewi, S., Agus, F., Velarde, S. J., & Ekadinata, A. (2010). Agroforestry for sustainable land-use: Fundamental research and its implementation in Indonesia. *Agroforestry Systems*, 80(2), 259–268.
- Hobbs, P. R., Sayre, K., & Gupta, R. (2008). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 543–555.
- International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC). (2019). *Community-based disaster risk reduction in Indonesia*. IFRC.
- Jovarauskas, D., Steponavičius, D., Kemžūraitė, A., Zinkevičius, R., & Venslauskas, K. (2021). Comparative analysis of the environmental impact of conventional and precision spring wheat fertilization under various meteorological conditions. *Journal of Environmental Management*, 296, 113150.
- June, T., & Sarvina, Y. (2023). *Strategi mempertahankan produksi pertanian dalam menghadapi perubahan iklim pertanian cerdas iklim*. IPB Press.
- Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B. M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., Caron, P., Cattaneo, A., Garrity, D. P., Henry, K., Hottle, R., Jackson, L., Jarvis, A., Kossam, F., Mann, W., McCarthy, N., Meybeck, A., Neufeldt, H., Remington, T. . . . Torquebiau, E. (2014). Climate-smart agriculture for food security. *Nature Climate Change*, 4(12), 1068–1072. <https://doi.org/10.1038/nclimate2437>
- Mardiastuti, A., & Nurrochmat, D. R. (2019). Agroforestry systems in Indonesia: a review of current status and future prospects. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 20(3), 656–673.

- Mary, G. S., Sugumaran, P., Niveditha, S., Ramalakshmi, B., Ravichandran, P., & Seshadri, S. (2016). Production, characterization and evaluation of biochar from pod (*Pisum sativum*), leaf (*Brassica oleracea*) and peel (*Citrus sinensis*) wastes. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 5(1), 43–53. <https://doi.org/10.1007/s40093-016-0116-8>
- Ministry of Agriculture. (2017). *National agriculture disaster risk reduction and management plan*. Ministry of Agriculture.
- OECD. (2018). *Agriculture and climate change*. Diakses pada 28 Maret, 2023, dari <https://www.oecd.org/greengrowth/sustainable-agriculture/agriculture-and-climate-change.htm>
- Pariwono, E., Kusuma, A., & Kuntjoro, T. (2018). Raising awareness on climate change among rice farmers in Indonesia. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 125, Artikel 012056). IOP Publishing.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P., & Smith, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532(7597), 49–57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>
- Quintarelli, V., Radicetti, E., Allevato, E., Stazi, S. R., Haider, G., Abideen, Z., Bibi, S., Jamal, A., & Mancinelli, R. (2022). Cover crops for sustainable cropping systems: A review. *Agriculture*, 12(12), 2076. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122076>
- Roshetko, J. M., Purnomasidhi, P., & Pramono, A. A. (2014). Indonesian agroforestry: tree gardens for sustainable livelihoods. *Small-scale Forestry*, 13(3), 287–301.
- Sarvina, Y., June, T., Sutjahjo, S. H., Nurmalina, R., & Surmaini, E. (2022). *Pengembangan sistem pertanian berkelanjutan berbasis climate smart agriculture* [Disertasi]. Institut Pertanian Bogor.
- Sarvina, Y., June, T., Sutjahjo, S. H., Nurmalina, R., & Surmaini, E. (2022). Climatic suitability for robusta coffee in West Lampung under climate change. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 950, Article 012015). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/950/1/012019>
- Sarvina, Y., June, T., Sutjahjo, S. H., Nurmalina, R., & Surmaini, E. (2021). The impacts of climate variability on coffee yield in five indonesian coffee production centers. *Coffee Science*, 16. <https://doi.org/10.25186/v16i.1917>

- Settle, W. H., Ariawan, H., Astuti, E. T., Cahyana, W., Hakim, A. L., Hindayana, D., Lestari, A. S., & Pajarningsih. (1996). Managing tropical rice pests through conservation of generalist natural enemies and alternative prey. *Ecology*, 77(7), 1975–1988.
- Stella Mary, G., Sugumaran, P., Niveditha, S., Ramalakshmi, B., Ravichandran, P., & Seshadri, S. (2016). Production, characterization, and evaluation of biochar from pod (*Pisum sativum*), leaf (*Brassica oleracea*), and peel (*Citrus sinensis*) wastes. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 5, 43–53. <https://doi.org/10.1007/s40093-016-0116-8>
- Suryadi, F. X., & Marwati, S. (2019). Adaptation strategies of agricultural sector towards climate change: Case study of paddy farming in Central Java, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1294(1), 012097.
- UNDP. (2018). *Building resilience to natural disasters in Indonesia*.
- UNEP. (2018). *New analysis outlines climate change adaptation strategies Indonesia*. Diakses pada 28 Maret, 2023, dari <https://www.unep.org/gan/news/editorial/new-analysis-outlines-climate-change-adaptation-strategies-indonesia>
- UNFCCC. (2022). *Enhanced nationally determined contribution Republic of Indonesia*. https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-09/23.09.2022_Enhanced%20NDC%20Indonesia.pdf
- Uphoff, N. (Ed.). (2015). *Conservation agriculture in rice-based systems: Examples from practice in Southeast Asia*. World Scientific Publishing.
- Utaminingsih, W., & Hidayah, S. (2012). Mitigasi emisi gas rumah kaca melalui penerapan irigasi intermittent di lahan sawah beririgasi. *Jurnal Irigasi*, 7(2), 132–141.
- Verhulst, N., Govaerts, B., Verachtert, E., Castellanos-Navarrete, A., Mezzalama, M., Wall, P. C., Chocobar, A., Deckers, J., & Sayre, K. D. (2014). Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems. Dalam R. Lal & B. A. Stewart (Ed.), *Advances in soil science: Food security and soil quality* (137–208). CRC Press.
- Wardhana, M. G., Wijayanto, A., & Pujiyanto. (2019). Disaster early warning system in Indonesia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 36, 101078.
- Zhang, X., Sun, H., Xia, X., Yang, Z., & Zhu, S. (2024). Can a crop rotation and fallow system reduce the carbon emission intensity of agriculture? *Land*, 13(3), 293. <https://doi.org/10.3390/land13030293>.

Bab XII

Sistem Padi Aerobik: Transformasi Pertanian Indonesia Menuju Produktivitas Berkelanjutan

Bhaskara Anggarda Gathot Subrata, Andrianto Ansari,
Taufan Alam

A. Praktik Pertanian dan Emisi GRK

Indonesia, sebagai salah satu produsen beras terkemuka di dunia memiliki peran yang sangat sentral dalam produksi beras global, serta menjadi elemen kunci dalam menjaga ketahanan pangan bagi lebih dari 270 juta penduduknya. Selain perannya yang penting dalam menyediakan pangan bagi bangsa dan negara, Indonesia juga menghadapi tantangan mendesak yang terkait erat dengan praktik budi daya padi, emisi gas rumah kaca. Metode penanaman padi tradisional di banyak daerah di Indonesia melibatkan sawah yang tergenang air. Hal tersebut menciptakan kondisi anaerobik pada tanah yang tergenang air sehingga menyebabkan produksi metana (CH_4) yang di produksi oleh bakteri *metanogens*, gas rumah kaca yang hampir setara dengan

B. A. G. Subrata, A. Ansari, & T. Alam

Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, *e-mail*: bhaskara.anggarda@mail.ugm.ac.id

© 2024 Editor & Penulis

Subrata, B. A. G., Ansari, A., Alam, T. (2024). Sistem padi aerobik: Transformasi pertanian Indonesia menuju produktivitas berkelanjutan. Dalam D. E. Nuryanto & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (353–391). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1244.c1396.
E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

30 kali lipat gas karbon dioksida (CO_2) di udara. Data terbaru menyoroti Indonesia merupakan penyumbang emisi gas metana tertinggi ketiga dari budi daya padi setelah Tiongkok dan India, pada tahun 2020 total emisi gas metana yang dihasilkan dari budi daya padi di Indonesia sebesar 2,2 kiloton tahun⁻¹ (FAOSTAT, 2023). Metana, gas yang jauh lebih efektif memerangkap panas dibandingkan karbon dioksida, berperan penting dalam perubahan iklim global (Singh, 2021). Kontribusi Indonesia terhadap emisi gas metana, terutama dari sawah yang terendam memperburuk perubahan iklim sehingga makin meningkatkan urgensi untuk mengatasi masalah ini. Selain itu, masifnya perubahan penggunaan lahan yang terkait termasuk meningkatnya deforestasi dan hilangnya habitat, menambah tantangan lingkungan yang dihadapi Indonesia.

Menyeimbangkan pentingnya ketahanan pangan, pertanian berkelanjutan, dan aksi iklim merupakan tugas berat bagi Indonesia dalam upaya mencapai kedaulatan pangan. Dalam hal ini, Indonesia perlu memperhatikan tantangan pengurangan emisi gas rumah kaca dari budi daya padi sembari memastikan pasokan beras yang stabil bagi penduduknya dan mendukung penghidupan jutaan petani padi. Dalam bab sebelumnya telah dibahas bagaimana pertanian cerdas iklim dilakukan untuk mengurangi emisi GRK, sekaligus menjadi langkah adaptasi sektor pertanian terhadap perubahan iklim yang terjadi. Salah satu strategi dalam melaksanakan pertanian cerdas iklim adalah dengan menerapkan sistem padi aerobik.

Bab ini membahas sistem padi aerobik sebagai pendekatan budi daya padi yang inovatif dan sadar lingkungan, yang mewakili solusi yang menjanjikan untuk mengatasi dua tantangan mendesak, yaitu mengurangi emisi gas metana dan memastikan ketahanan pangan. Sistem padi aerobik menunjukkan potensi untuk mengurangi emisi gas metana secara signifikan sehingga berkontribusi terhadap upaya mitigasi perubahan iklim secara global (Hussain et al., 2020; Susilawati et al., 2019). Selain itu, dalam perjalanan menuju masa depan yang lebih berkelanjutan dengan konsep padi aerobik ini, terbuka peluang

baru dalam perdagangan karbon yang dapat memberdayakan petani padi kecil dan sekaligus berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim.

Dengan mengeksplorasi kelayakan dan potensi penerapan praktik sistem padi aerobik di Indonesia, kita tak hanya berkontribusi pada upaya mitigasi perubahan iklim dan ketahanan pangan, tetapi juga mendorong keberlanjutan sektor pertanian. Penerapan sistem padi aerobik bukan sekadar strategi menarik. Ini adalah langkah konkret untuk secara bersamaan mengurangi emisi gas metana, mengatasi perubahan iklim, dan menjamin ketahanan pangan. Dengan demikian, sistem padi aerobik menjadi jalur transformatif menuju praktik pertanian berkelanjutan yang memiliki relevansi global, memberikan fondasi penting bagi pendekatan pertanian inovatif dalam menghadapi tantangan mendesak pada saat ini dan pada masa depan.

B. Metana dalam Pemodelan Iklim dan Pengurangan Emisi Pertanian

Emisi gas metana memegang peran sentral dalam pemahaman perubahan iklim global. Metana, yang dikenal sebagai CH_4 , merupakan salah satu gas rumah kaca yang memiliki dampak signifikan terhadap perubahan iklim. Oleh karena itu, metana menjadi parameter penting dalam pemodelan iklim karena pemahaman tentang perilaku dan konsentrasi metana dalam atmosfer sangat vital untuk meramalkan perubahan iklim pada masa depan. Dengan mengintegrasikan data emisi metana dari berbagai sumber, kita dapat mengembangkan berbagai skenario iklim yang merinci perkiraan konsentrasi metana untuk setiap skenario tersebut. Skenario iklim adalah alat penting untuk memahami bagaimana emisi gas rumah kaca, termasuk metana, dapat memengaruhi perubahan iklim pada masa depan. Dalam konteks budi daya padi terdapat beberapa model simulasi terkait dengan skenario iklim yang digunakan untuk memprediksi konsentrasi metana.

Pertama, model Methane Emissions in Rice EcoSystems (MERES) yang digunakan untuk menyimulasikan emisi metana dari lahan padi. Model ini menggunakan rutin yang ada dalam model simulasi tanam-

an CERES-Rice untuk memprediksi jumlah substrat yang tersedia untuk metanogenesis. Model ini juga telah digunakan bersama dengan data cuaca harian, data tanah spasial, dan statistik pertanian padi untuk memperkirakan emisi metana tahunan dari Tiongkok, India, Indonesia, Filipina, dan Thailand di bawah berbagai skenario manajemen tanaman. Skenario tersebut termasuk penambahan pupuk hijau, drainase lahan, dan kombinasi keduanya (Matthews et al., 2000).

Kedua, Model DAYCENT dan DNDC telah digunakan untuk menyimulasikan emisi metana dan hasil panen padi. Kedua model ini adalah model biogeokimia yang mapan dan telah digunakan dalam berbagai penelitian untuk memprediksi emisi gas rumah kaca dari sistem pertanian. Model DAYCENT, misalnya, telah digunakan untuk menyimulasikan emisi metana, hasil panen, dan karbon organik tanah dalam sistem padi subtropis di Brasil Selatan. Meskipun model ini mampu menyimulasikan pola umum aliran metana harian dari tanah dengan beberapa penyimpangan, model ini gagal merepresentasikan potensi pengolahan tanah tanpa olah untuk mengurangi emisi metana. Sementara itu, penelitian lain telah menggunakan model DAYCENT dan DNDC untuk membandingkan estimasi emisi metana dan hasil panen untuk sistem penanaman padi ganda di Tiongkok Selatan. Kedua model tersebut dikalibrasi dan divalidasi menggunakan data yang diukur di lapangan dari November 2008–November 2014. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua model tersebut efektif dalam memperkirakan pola emisi metana harian (Guo et al., 2023).

Ketiga, model Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) telah digunakan untuk menyimulasikan potensi penghematan air dan mitigasi metana dari lahan padi di bawah irigasi pengeringan dan penggenangan bergantian. Model ini digunakan bersama dengan model Denitrification Decomposition (DNDC) dan Agro-ecological Zone (AEZ) untuk memperkirakan potensi pengurangan irigasi dan emisi CH_4 di tingkat regional. Pada studi ini, data observasi padi, data iklim, dan informasi tanah digunakan sebagai input model. Parameter genetik padi dikalibrasi menggunakan DSSAT dan hasil panen padi, irigasi, dan emisi CH_4 disimulasikan

menggunakan DNDC di 24 situs observasi agrometeorologi di Tiongkok. Hasil dari skala situs ini kemudian ditingkatkan ke skala spasial di bawah skenario irigasi *alternate wetting and dry* (aerobik) dan irigasi konvensional. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dibandingkan irigasi konvensional, di bawah skenario irigasi AWD (aerobik) rasio penghematan air di area padi timur laut adalah 23%–34%, dan di area padi selatan adalah 18%–50%. Rasio pengurangan emisi CH_4 di Timur Laut adalah 60%–71%, dan di Selatan adalah 34%–65%. Secara umum, efek mitigasi emisi CH_4 di area padi timur laut dan efek penghematan air di area padi selatan lebih baik (Fan et al., 2021).

Pada tahun 2018, emisi metana dan oksida nitrat dari aktivitas tanaman dan peternakan berkontribusi sebesar 5,3 miliar ton CO_2 , tumbuh 14% sejak tahun 2000 (EPA, 2021). Secara global, produksi padi adalah salah satu kontributor terbesar terhadap emisi metana. Hal ini terjadi karena padi sering kali ditanam di sawah yang tergenang air sehingga menciptakan kondisi anaerobik di dalam tanah yang kondusif bagi produksi metana. Diperkirakan bahwa budi daya padi berkontribusi pada sebagian besar emisi metana global, terutama di wilayah di mana beras merupakan makanan pokok. Metana dari budi daya padi berkontribusi sekitar 1,5% dari total emisi gas rumah kaca global dan dapat meningkat secara substansial. Sementara itu, sawah menyumbang 12% emisi metana antropogenik global, setara dengan 1,5% dari total efek pemanasan semua gas rumah kaca (ADB, 2023). Namun, perlu dicatat bahwa emisi metana hanya merupakan sebagian dari total emisi gas rumah kaca. Sektoral lain, seperti produksi listrik dan panas, transportasi, dan manufaktur, serta konstruksi juga berkontribusi signifikan terhadap total emisi.

Peluang 'skenario iklim' baru yang berdasarkan pada hasil penurunan emisi pertanian membuka pandangan yang menarik tentang upaya mitigasi yang sangat penting dalam menangani emisi metana, yang menjadi faktor penting dalam perubahan iklim global. Data menunjukkan bahwa emisi CH_4 diperkirakan akan terus meningkat sebesar 9%–72% setara dengan peningkatan sekitar 412–654 Mt CH_4 /tahun (Lan et al., 2022). Oleh karena itu, mitigasi langsung emisi

CH_4 dari sektor pertanian menjadi kunci dalam mengurangi emisi gas ini. Studi menunjukkan bahwa tindakan mitigasi yang diarahkan langsung ke emisi CH_4 dapat mengurangi emisi hingga 50%–74% (Toorn et al., 2021).

Keterbatasan potensi pengurangan emisi CH_4 di sektor selain pertanian menyoroti pentingnya mengatasi masalah emisi metana di sektor pertanian itu sendiri. Karena faktor ini, emisi CH_4 dari sektor pertanian diperkirakan akan makin besar dalam kontribusinya terhadap total emisi CH_4 antropogenik dalam skenario mitigasi. Namun, saat ini telah muncul beberapa metode inovatif dari pertanian lahan basah yang berfokus pada meminimalkan emisi CH_4 . Jika metode-metode ini dapat diterapkan secara masif, terdapat peluang untuk menciptakan kondisi iklim yang lebih baik pada masa depan. Penggunaan model simulasi tanaman dan dinamika produksi CH_4 membantu dalam memperkirakan dampak berbagai skenario pengelolaan tanaman terhadap emisi CH_4 secara lokal, nasional, regional, dan global yang dapat membuka pintu bagi perkiraan baru dalam memprediksi iklim pada masa yang akan datang.

Salah satu metode yang cukup dapat diandalkan dalam usaha mengurangi emisi metana dari pertanian adalah sistem pertanian padi aerobik. Metode ini mempromosikan praktik yang meningkatkan aerasi tanah, yang mengurangi kondisi anaerobik yang mendukung produksi metana. Dengan demikian, pemahaman mendalam tentang inovasi sistem pertanian padi aerobik dalam pengelolaan pertanian dan pengurangan emisi CH_4 dapat menciptakan peluang penting untuk mengurangi kontribusi pertanian terhadap perubahan iklim dan membuka jalan bagi skenario iklim yang lebih berkelanjutan.

C. Sistem Padi Aerobik: Praktik dan Prinsip

Sistem padi aerobik mewakili perubahan revolusioner dari praktik budi daya padi tradisional yang tergenang air. Tujuannya sangat jelas, yaitu untuk mengurangi emisi gas metana sekaligus menjamin ketahanan pangan berkelanjutan. Pendekatan inovatif ini berfokus pada pemeliharaan kondisi tanah aerobik dan kaya oksigen di

seluruh siklus penanaman padi. Salah satu elemen kunci dari sistem padi aerobik adalah irigasi berselang (Gambar 12.1). Tidak seperti sawah tradisional yang tergenang air secara kontinu, di mana sawah terus-menerus terendam, sawah aerobik mengalami siklus pembasahan dan pengeringan yang terkendali (Ishfaq et al., 2020). Penerapan irigasi berkala secara signifikan mampu mengurangi emisi gas metana karena pengeringan tanah secara berkala mengganggu kondisi anaerobik yang kondusif bagi mikroba penghasil gas metana (Adhya et al., 2014; E. Pratiwi et al., 2021; Sharma et al., 2016). Pengurangan emisi gas metana ini sejalan dengan upaya global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan mitigasi perubahan iklim.

Aspek penting lainnya dari sistem padi aerobik adalah aerasi tanah, yang memainkan peran penting dalam menjaga kondisi aerobik (Datta et al., 2017). Kemajuan terkini dalam ilmu tanah menekankan pentingnya meningkatkan aerasi tanah untuk mengurangi emisi gas metana. Teknik aerasi tanah mekanis, seperti budi daya dengan pembajakan dangkal dan minim pembajakan, telah disempurnakan untuk memperbaiki struktur tanah, meningkatkan pergerakan udara, dan mencegah berkembangnya zona anaerobik (Aparicio et al., 2022; Mehra et al., 2018). Irigasi tetes merupakan salah satu contoh teknik aerasi tanah dengan meneteskan air melalui pipa-pipa secara setempat di sekitar tanaman atau sepanjang larikan tanaman, seperti yang terlihat pada Gambar 12.1. Selain itu, pendekatan biologis, seperti penggabungan bahan organik dan penggunaan tanaman penutup tanah, makin meningkatkan aerasi tanah dengan mendorong aktivitas mikroba yang bermanfaat (Brust, 2019; dos Santos Cordeiro et al., 2022). Inovasi-inovasi ini berkontribusi dalam mengurangi emisi gas metana sekaligus meningkatkan kesehatan dan ketahanan tanah.



Sumber: Netafim (2023)

Gambar 12.1 Sistem Padi Aerobik Menggunakan Irigasi Tetes

Pemilihan varietas padi yang tepat merupakan bagian integral dari keberhasilan sistem padi aerobik. Perkembangan terkini dalam pemuliaan padi dan genetika telah menghasilkan ketersediaan varietas padi yang secara khusus disesuaikan dengan kondisi aerobik. Padi varietas aerobik menunjukkan ciri-ciri seperti sistem perakaran yang lebih dalam dan peningkatan toleransi terhadap irigasi berselang sehingga dapat memastikan bahwa padi dapat tumbuh subur di tanah yang kaya oksigen dan tahan terhadap periode kekeringan tanah sementara yang menjadi ciri budi daya aerobik (Helmi et al., 2021; Ullah & Datta, 2018; Xu et al., 2015). Adopsi varietas yang diadaptasi ini makin meningkatkan kelayakan dan potensi sistem padi aerobik. Aspek lain dari kemampuan adaptasi tanah terletak pada pemilihan atau pemuliaan varietas padi aerobik yang selaras dengan jenis tanah tertentu. Kemajuan terkini dalam pemuliaan tanaman dan genetika memungkinkan pengembangan varietas padi yang disesuaikan dengan berbagai profil tanah. Varietas yang disesuaikan ini menunjukkan ketahanan dalam menghadapi variabilitas tanah, memastikan pertumbuhan yang kuat dan pengurangan gas metana di berbagai zona agroekologi.

Salah satu masalah yang menghambat keberhasilan sistem padi aerobik adalah adanya masalah gulma. Kehadiran gulma yang beragam dan kompleks, serta risiko berkembangnya resistensi herbisida makin menekankan perlunya penerapan pengelolaan gulma terpadu dalam sistem padi aerobik. Untuk mengatasi tantangan ini, ada beberapa pilihan pengendalian gulma yang dapat diambil, termasuk langkah-langkah preventif, seperti budi daya, fisik, dan kimia. Penerapan praktik pengendalian gulma secara terpadu, yang mencakup persemaian umur tua, solarisasi tanah, pemberian mulsa, dan penyiraman manual, bukan hanya akan efektif dalam mengendalikan gulma dalam sistem padi aerobik, tetapi juga akan meningkatkan kualitas hasil panen secara keseluruhan. Dengan menggabungkan berbagai strategi ini, petani dapat mengatasi tantangan gulma dengan lebih efisien dalam konteks budi daya padi aerobik yang berkelanjutan (Jabran & Chauhan, 2015). Di sisi lain, dengan penerapan sistem padi aerobik, berpotensi akan meningkatnya produksi *nitrite* dan *nitrate* di dalam tanah, yang mana kedua zat tersebut merupakan sumber dari pembentukan *nitrous oxide* (N_2O) sebagai salah satu gas rumah kaca yang berasal dari siklus nitrogen yang berasal dari biotik maupun abiotik proses (Lin et al., 2022; Mukhtar et al., 2023)

Analisis komparatif antara sistem padi aerobik dan praktik budi daya padi tradisional yang tergenang menunjukkan perbedaan utama dalam hal dampak lingkungan, produktivitas, dan keberlanjutan. Secara khusus, sistem padi aerobik unggul dalam mengurangi emisi gas metana, gas rumah kaca yang kuat, melalui kondisi tanah yang kaya oksigen yang dicapai melalui irigasi berselang dan aerasi tanah. Penelitian terbaru secara konsisten menunjukkan pengurangan substansial dalam emisi gas metana di sawah aerobik dibandingkan sistem penggenangan tradisional (Peyron et al., 2016; Sapkota et al., 2020). Selain itu, pengurangan metana ini tidak mengorbankan hasil panen; pada kenyataannya, padi sistem aerobik memiliki potensi untuk mempertahankan atau bahkan meningkatkan produktivitas tanaman (Ahmed et al., 2017; Surendran et al., 2021). Keseimbangan antara pengurangan emisi dan peningkatan hasil panen ini membuat padi aerobik menjadi pilihan yang menarik untuk pertanian berkelanjutan.

Sistem padi aerobik juga menunjukkan peningkatan efisiensi penggunaan air, mengurangi degradasi tanah, dan kemampuan beradaptasi dengan beragam zona agroekologi (Tao et al., 2015; Wang et al., 2020). Sistem ini menggunakan lebih sedikit air karena irigasi berselang sehingga berkontribusi pada peningkatan pengelolaan sumber daya air. Kesehatan dan ketahanan tanah mendapat manfaat dari aerasi tanah dan berkurangnya genangan air, menghasilkan struktur tanah dan aktivitas mikroba yang lebih baik. Selain itu, fleksibilitas sistem ini memungkinkannya untuk beradaptasi dengan berbagai kondisi, menawarkan opsi budi daya padi yang berkelanjutan dan bertanggung jawab terhadap lingkungan. Sebaliknya, sistem sawah tradisional yang tergenang, meskipun dapat mempertahankan hasil panen yang stabil, memiliki tantangan terkait penggunaan air, degradasi tanah, dan kemampuan beradaptasi terhadap kondisi lokal.

D. Emisi Gas Rumah Kaca dan Pengurangan Gas Metana dalam Sistem Padi Aerobik

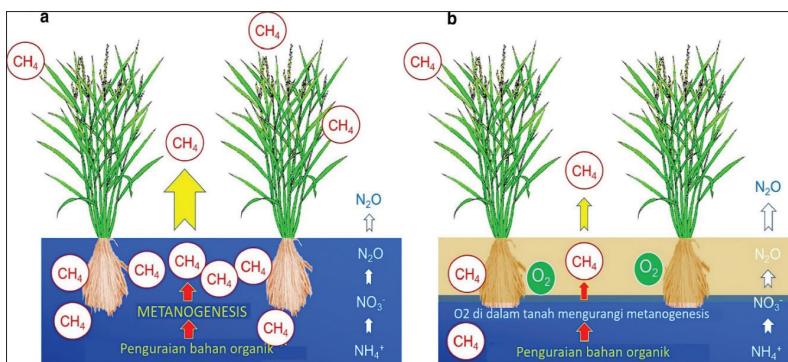
Emisi gas rumah kaca, terutama metana (CH_4) yang berasal dari kegiatan pertanian terus menjadi penyebab utama perubahan iklim global. Studi terbaru menggarisbawahi peran penting pertanian, khususnya penanaman padi dalam mitigasi emisi gas metana. Dalam konteks ini, penting untuk memberikan tinjauan komprehensif terhadap bukti ilmiah terbaru yang mendukung pengurangan emisi gas metana dalam sistem padi aerobik. Data terbaru, yang dikumpulkan dari berbagai negara, menegaskan kembali keberhasilan sistem padi aerobik dalam mengurangi emisi gas metana (Tabel 12.1). Berbagai penelitian lapangan, yang dilakukan di berbagai wilayah dengan iklim dan jenis tanah yang berbeda-beda, secara konsisten melaporkan penurunan emisi gas metana yang signifikan jika dibandingkan sawah tradisional yang tergenang air.

Tabel 12.1 Total Kumulatif Emisi Gas Metana (CH_4) Budi Daya Padi Sistem Tradisional dan Aerobik

Lokasi	Tahun	Sistem Budi daya	Emisi Gas Metana (kg ha^{-1})	Sumber
India	2010	Tradisional	57,9	Sharma et al., (2016)
		Aerobik	4,3	
Tiongkok	2013	Tradisional	177,2	Chu et al., (2015)
		Aerobik	91,7	
Amerika	2013	Tradisional	144,2	Linquist et al., (2015)
		Aerobik	71,4	
Indonesia	2020	Tradisional	38,9	Viandari et al., (2020)
		Aerobik	12,6	
Bangladesh	2020	Tradisional	239,1	Islam et al., (2022)
		Aerobik	173,3	

Salah satu temuan kunci dalam penelitian terbaru adalah peran sentral yang dimainkan oleh oksigen dalam menghambat metanogenesis, proses mikroba yang bertanggung jawab atas produksi metana di lingkungan anaerobik (Luo et al., 2023). Pada sistem padi tradisional yang terus-menerus tergenang air, di mana oksigen sangat terbatas, mikroba metanogen berkembang subur dalam kondisi anaerobik ini sehingga berkontribusi secara signifikan terhadap emisi gas metana. Namun, melalui penelitian terbaru yang menggunakan teknologi mikrobiologi dan molekuler canggih, kita sekarang dapat memahami bagaimana oksigen dapat mengganggu enzim penting dan faktor pendukung yang kritis dalam proses metanogenesis (Jiang et al., 2022). Emisi gas metana dari budi daya padi tradisional yang memerlukan genangan air dapat mengganggu pasokan oksigen ke rizosfer, menciptakan suatu lingkungan yang bersifat anaerobik. Di dalam kondisi ini, proses dekomposisi anaerobik bahan organik dalam tanah menghasilkan gas metana yang kemudian dilepaskan ke atmosfer melalui berbagai mekanisme, seperti difusi, ebullisi, dan aerenkim yang terdapat pada akar dan batang tanaman (Gambar

12.2a). Sementara itu, pada sistem padi aerobik, siklus pembasahan dan pengeringan yang teratur memungkinkan oksigen dapat masuk ke dalam tanah, menciptakan lingkungan yang bersifat aerobik. Keberadaan oksigen ini mengurangi produksi gas metana dalam tanah (Gambar 12.2b) (Heredia et al., 2021). Temuan ini memperkuat bukti bahwa pendekatan budi daya seperti ini tidak hanya berpotensi untuk meningkatkan efisiensi pertanian, tetapi juga memiliki dampak positif dalam mengurangi dampak lingkungan, khususnya dalam mengendalikan emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim global.



Keterangan: Proses pembentukan emisi gas metana pada (a) sistem padi tradisional, (b) sistem padi aerobik

Sumber: Gambar diadaptasi dari Heredia et al. (2021)

Gambar 12.2 Proses Pembentukan Emisi Gas Metana

Selain itu, penelitian lain telah menyelidiki dinamika komunitas mikroba di dalam tanah padi aerobik. Dengan memanfaatkan teknologi pengurutan DNA yang canggih, para ilmuwan telah mengidentifikasi bahwa sistem padi aerobik mendorong populasi mikroba yang kurang kondusif untuk metanogenesis (Vishwakarma & Dubey, 2020). Keunggulan kompetitif mikroba nonmetanogenik di lingkungan kaya oksigen selanjutnya berkontribusi terhadap pengurangan emisi gas metana. Selain itu, penelitian ini juga mempertimbangkan

putaran umpan balik yang kompleks dan faktor lingkungan yang memengaruhi emisi gas metana, termasuk suhu tanah, tingkat kelembapan, dan kandungan karbon organik. Sensitivitas interaksi ini dan menekankan pentingnya mengoptimalkan kondisi tanah untuk memaksimalkan pengurangan gas metana dalam sistem padi aerobik (Luo et al., 2023).

Rata-rata, data terkini menunjukkan bahwa emisi gas metana dari sistem pertanian aerobik dapat dikurangi secara signifikan, berkisar antara 30%–70%, bergantung pada kondisi lokal dan praktik pengelolaan (Sharma et al., 2016). Pengurangan substansial ini sejalan dengan komitmen Indonesia dalam mitigasi emisi gas rumah kaca dan berkontribusi terhadap upaya mitigasi perubahan iklim global. Lebih jauh lagi, dalam konteks pertanian berkelanjutan menekankan kemampuan adaptasi budi daya padi aerobik terhadap beragam zona agroekologi di Indonesia, memastikan bahwa pendekatan inovatif ini dapat disesuaikan dengan kondisi lokal sekaligus mengatasi tantangan mendesak berupa emisi gas metana dan perubahan iklim.

E. Kemampuan Sistem Padi Aerobik Beradaptasi di Zona Agroekologi Indonesia

Indonesia, dengan spektrum zona iklim yang sangat luas, membentang dari hutan hujan tropis yang subur hingga daerah kering (Wijaya, 2019), memunculkan beragam tantangan dan peluang dalam menerapkan sistem padi aerobik. Di wilayah-wilayah dengan curah hujan tinggi, tantangan utamanya adalah mengatasi risiko genangan air melalui penggunaan irigasi berkala, yang merupakan dasar dari budi daya padi aerobik. Dengan memantau data cuaca secara teliti dan menggunakan pemodelan prediktif, petani dapat mengambil keputusan yang cerdas mengenai kapan dan seberapa banyak irigasi yang perlu dilakukan. Pendekatan cerdas terhadap faktor iklim ini memungkinkan mereka untuk mencapai keseimbangan yang tepat, menghindari kelebihan air yang dapat mengakibatkan kondisi tanah anaerobik dan emisi gas metana. Di sisi lain, irigasi yang terputus-putus dapat diatur sedemikian rupa untuk menjaga kondisi tanah

yang aerobik, bahkan di daerah-daerah dengan curah hujan yang tinggi (Ansari, Pranesti, et al., 2023).

Sebaliknya, di daerah yang lebih kering dan memiliki sumber air yang terbatas, penting sekali untuk menerapkan praktik pengelolaan air yang efisien guna menjaga kondisi tanah tetap aerobik. Teknik irigasi yang presisi, berlandaskan data *real-time* dan proyeksi iklim, memberikan kekuatan kepada petani untuk menghemat air sekaligus memastikan kelembapan tanah yang cukup untuk pertumbuhan padi. Dengan penyesuaian jadwal dan metode irigasi sesuai dengan karakteristik lokal, daerah-daerah seperti ini dapat mempertahankan kondisi aerobik tanah sambil mengatasi tantangan kelangkaan air yang mungkin dihadapi (Ansari, Pranesti, et al., 2023).

Selanjutnya, adaptasi sistem padi aerobik di berbagai zona agroekologi di Indonesia sangat bergantung pada sifat tanah yang kompleks dan beragam. Oleh karena itu, langkah dasar yang sangat penting adalah melakukan pengujian dan analisis tanah untuk menyesuaikan budi daya padi aerobik dengan kondisi tanah setempat. Dalam usaha untuk mengurangi emisi gas metana sambil memastikan produktivitas tanaman yang optimal, pemahaman mendalam tentang kebutuhan unsur hara spesifik dan karakteristik fisik tanah menjadi kunci (Maharjan et al., 2018). Pengujian tanah membantu dalam mengarahkan pengelolaan unsur hara secara presisi sehingga petani dapat menggunakan pupuk dengan bijaksana dan menghindari pemakaian berlebihan yang dapat berkontribusi pada emisi yang tidak diinginkan (Abbas et al., 2022). Penggunaan sensor, seperti *soil moisture sensor*, *pH sensor*, serta pemanfaatan data cuaca yang berasal dari *automatic weather station* yang di integerasikan dengan teknologi *internet of things* (IoT) dapat diakses secara *real-time*, di mana pun dan kapan pun dapat di maksimalkan dalam mendukung suksesnya sistem padi aerobik (Ansari, Pranesti, et al., 2023). Pendekatan berbasis data seperti ini tidak hanya mendukung keberlanjutan lingkungan tetapi juga meningkatkan efisiensi ekonomi dalam budi daya padi aerobik.

Mengkaji kemampuan adaptasi sistem padi aerobik terhadap beragam zona agroekologi di Indonesia sangat penting untuk memahami

potensi dan tantangan sistem dalam lanskap pertanian yang memiliki beragam aspek. Kompleksitas geografis Indonesia mencakup beragam iklim, jenis tanah, dan faktor geografis yang memengaruhi kinerja dan kesesuaian praktik pertanian. Beberapa penelitian menunjukkan beberapa keberhasilan penerapan dan mengoptimalkan manfaat sistem padi aerobik (Tabel 12.2).

Tabel 12.2 Kemampuan Sistem Padi Aerobik Beradaptasi di Zona Agroekologi Indonesia

Sumber	Zona Agroekologi	Sistem Budi daya	Hasil
Alam et al., (2021)	Agroforestri kayu putih dengan ketinggian 100 mdpl; suhu rata-rata 29.38 °C, kelembapan 81.90%, curah hujan 1,182 mm tahun ⁻¹ ; Jenis tanah Lithic Haplusterts (vertisol; rejim kelengasan ustic; terdapat kontak batu < 50 cm), Ustic Epiaquverts (vertisol; rejim kelengasan ustic; tergenang selama < 6 bulan), and Vertic Haplustalfs (alfisol; rejim kelengasan ustic; solum > 100 cm)	Budi daya aerobik diantara tegakan kayu putih (<i>Melaleuca cajuputi</i>); 15 varietas padi; Pengolahan tanah minimum; Tanam benih langsung; irigasi tadaah hujan.	Varietas padi Situ Patenggang menunjukkan hasil tertinggi masing-masing 4.87 dan 5.45 ton ha ⁻¹ pada Lithic Haplusterts dan Vertic Haplustalfs. Galur harapan GM 28 menunjukkan hasil tertinggi 6.49 ton ha ⁻¹ pada Ustic Epiaquverts. Ciherang, galur harapan GM 2, galur harapan GM 8, galur harapan GM 11, galur harapan GM 28, Inpari 6 Jete, Inpari 33, IR-64, dan Way Apo Buru tergolong varietas yang stabil dan cukup stabil, sedangkan varietas yang lain tergolong tidak stabil.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Sumber	Zona Agroekologi	Sistem Budi daya	Hasil
Suryanto et al., (2020)	Agroforestri kayu putih dengan ketinggian 100 mdpl; suhu rata-rata 25.54°C, kelembaban 83.90%, curah hujan selama penelitian 470 mm; Jenis tanah Lithic Haplusterts (vertisol; rejim kelengasan ustic; terdapat kontak batu < 50 cm)	Budi daya aerobik diantara tegakan kayu putih (<i>Melaleuca cajuputi</i>); Pengolahan tanah minimum; Tanam benih langsung; Irigasi tadaah hujan; Penggunaan sistem panen air hujan; Pemanfaatan bahan organic <i>in situ</i> berupa gulma siam (<i>Chromelanena odorata</i>)	Pada musim kemarau penggunaan system panen air hujan berupa parit + seresah organik yang diintegrasikan dengan aplikasi kompos gulma siam sebesar 10 ton/ha menghasilkan produktivitas sebesar 2.97 ton/ha atau mengalami peningkatan sebesar 91.75% dibandingkan tanpa penggunaan system panen air hujan dan aplikasi kompos gulma siam.
(Subrata et al., 2016)	Lahan pasir pantai dengan ketinggian 10 mdpl; suhu rata-rata 35.33°C, kelembapan 60.5%, curah hujan 378.7 mm tahun ⁻¹ ; Jenis tanah berpasir (>80%).	Budi daya aerobik tumpang sari dengan kacang hijau; Varietas padi Segreng Handayani; Pengolahan tanah minimum; Tanam benih persemian usia 21 hari; irigasi permukaan berselang.	Hasil terbaik diperoleh dari perlakuan tumpang sari (padi 60%: kacang hijau 40%) dengan potensi hasil 4.08 ton ha ⁻¹ dengan nilai Ekonomi mencapai Rp39,502,339,00 dan R/C ratio 1.60.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Sumber	Zona Agroekologi	Sistem Budi daya	Hasil
Marpaung et al., (2021)	Wilayah dataran tinggi dengan ketinggian 800-1200 mdpl dan berlereng; suhu rata-rata 17 °C—23 °C, kelembapan 85.94%, curah hujan 2966.17 mm tahun ⁻¹ ; Jenis tanah Aluvium.	Budi daya aerobik monokultur padi; Varietas lokal Simedan, Sirias, Sipendek, Sihaminjon; Pengolahan tanah minimum; Tanam benih langsung dan pindah tanam persemaian usia 15-30 hari; Irigasi tada hujan.	Budi daya padi sistem aerobik pada agroekosistem sawah dataran tinggi menerapkan pertanaman padi 1 kali dalam setahun. Dengan keterbatasan teknologi budi daya padi yang dilakukan petani masih memberikan produktivitas rata-rata untuk sistem tanam pindah tanam (3.9—4.5 ton ha ⁻¹), sedangkan sistem tanam benih langsung (3.7—4.2 ton ha ⁻¹)

Selain itu, strategi yang bertujuan untuk meningkatkan kesehatan dan struktur tanah melalui penggabungan bahan organik dan tanaman penutup tanah telah mencuri perhatian. Praktik-praktik ini bukan hanya memperkuat kemampuan adaptasi sistem padi aerobik, tetapi juga memberikan kontribusi yang berharga terhadap kesuburan dan keberlanjutan tanah dalam jangka panjang. Penelitian terbaru makin menegaskan manfaat penggunaan bahan organik berupa biochar dengan penerapan 2% dan 4 % dari berat total tanah mampu menurunkan emisi gas metana sebesar 45,2%–54.9% (Pratiwi & Shinogi, 2016).

Geografi kepulauan Indonesia yang luas, ditandai dengan jaringan pulau yang luas dan beragam zona agroekologi. Indonesia memiliki lahan daratan yang mencakup luas mencapai 191,09 juta hektare. Lahan tersebut terbagi menjadi beberapa kategori, termasuk lahan kering seluas 144,47 juta hektare, lahan rawa seluas 34,12 juta hektare, lahan basah non rawa seluas 9,44 juta hektare, dan sisanya digunakan untuk permukiman, perkotaan, pertambangan, serta tubuh air, seperti waduk, danau, dan sungai (Ritung et al., 2015). Namun, perlu diperhatikan bahwa lahan basah nonrawa, yang selama ini

menjadi sumber produksi utama untuk padi sawah, memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, saatnya bagi kita untuk mempertimbangkan pengembangan sistem padi aerobik di lahan kering, yang merupakan jenis lahan dengan luas paling besar di Indonesia.

Dalam konteks saat ini, untuk mengatasi faktor geografis memerlukan pendekatan inovatif dan terdesentralisasi serta strategi adaptasi lokal untuk memastikan keberhasilan penerapan metode budi daya padi yang bertanggung jawab terhadap lingkungan. Penerapan utamanya adalah pentingnya desentralisasi. Perlunya mengakui keragaman kondisi dan kebutuhan di berbagai pulau dan wilayah di Indonesia memerlukan pendekatan desentralisasi sebagai kunci. Pendekatan ini memberikan kekuasaan kepada masyarakat lokal dan pemangku kepentingan untuk merancang strategi adaptasi yang sesuai dengan realitas setempat. Pentingnya membangun jaringan regional juga menjadi faktor penting dalam upaya ini. Hal ini memungkinkan petani untuk bertukar pengalaman dan wawasan tentang budi daya padi aerobik yang sesuai dengan situasi lokal. Jaringan ini memfasilitasi sosialisasi praktik terbaik, yang dapat mengoptimalkan pengurangan gas metana sekaligus menjaga ketahanan pangan.

Selain itu, distribusi varietas tanaman yang tepat juga merupakan aspek penting dalam adaptasi geografis. Kerja sama erat antara lembaga penelitian dan penyuluhan pertanian dengan masyarakat lokal akan memastikan ketersediaan varietas padi yang sesuai dengan kondisi agroekologi di tiap wilayah. Pendekatan yang disesuaikan ini akan memperkuat kemampuan adaptasi dan ketahanan sistem padi aerobik dalam menghadapi keragaman geografis yang ada.

F. Meningkatkan Praktik Pertanian Berkelanjutan dengan Sistem Padi Aerobik

Mengevaluasi potensi sistem padi aerobik untuk meningkatkan keberlanjutan pertanian merupakan upaya yang sangat penting, terutama dalam kerangka pengurangan penggunaan air, optimalisasi pengelolaan unsur hara, hingga pengendalian gulma yang efektif.

Salah satu keunggulan utama sistem padi aerobik terletak pada berkurangnya kebutuhan air secara signifikan dibandingkan sistem penggenangan tradisional. Beberapa penelitian menunjukkan potensi penghematan air yang besar yang terdapat pada padi aerobik (Tabel 12.3). Di dunia yang makin disibukkan dengan krisis kelangkaan air akibat efek dari perubahan iklim, penerapan sistem padi aerobik tidak hanya berfungsi sebagai pelindung sumber daya air, namun juga mendukung praktik pengelolaan air yang berkelanjutan.

Tabel 12.3 Efisiensi Penggunaan Air, Produktivitas Air, dan Hasil Panen Padi di Bawah Pengelolaan Air yang Berbeda

Negara	Metode	Keterangan	Sumber
Thailand	Konvensional (K) dan Aerobik (A)	Dibandingkan dengan K, A meningkatkan hasil panen gabah sebesar 15% selama musim hujan dan 7% selama musim kemarau. Dibandingkan K, A meningkatkan total produktivitas air sebesar 46% selama musim hujan dan 77% selama musim kemarau.	(Maneepitak, Ullah, Datta, et al., 2019; Maneepitak, Ullah, Paothong, et al., 2019)
Tiongkok	Irigasi Hemat Air (IHA), Irrigasi Tergenang (IT)	Sekitar 94.19% lahan sawah di Cina cocok untuk irigasi hemat air (IHA). Dibandingkan dengan IT, dengan menerapkan IHA, Tiongkok dapat meningkatkan hasil panen padi sebesar 5.39–6.87%. Dengan menggunakan IHA, Tiongkok dapat menghemat 22.06–26.41% air irigasi untuk sawah. Tiongkok dapat meminimalkan kehilangan nitrogen dari padi sebesar 32.11–39.11% dengan IHA.	Zhuang et al., (2019)
Indonesia	Konvensional (K) dan Aerobik (A)	Dibandingkan K, A memiliki kemampuan menghemat penggunaan air mencapai 21% pada musim kemarau dan 14% pada musim hujan.	Setyanto et al., (2018)

Pengurangan penggunaan air ini terutama berlaku di daerah-daerah yang mengalami kelangkaan air atau menghadapi pola curah hujan yang tidak menentu baik spasial maupun temporal karena hal ini menjamin alokasi sumber daya air yang terbatas secara efisien (Burak & Margat, 2016). Selain itu, manfaat lingkungan dan ekonomi dari berkurangnya penggunaan air juga sangat besar. Penerapan praktik hemat air, seperti sistem padi aerobik dapat berkontribusi pada pengurangan kekurangan air, menjaga ekosistem, dan mendukung penghidupan banyak komunitas (Lampayan et al., 2015).

Peningkatan produksi padi dapat dilakukan dengan penggunaan varietas padi yang adaptif terhadap kondisi lingkungan setempat. Varietas padi merupakan teknologi yang solutif, mudah diaplikasikan petani, dan harganya terjangkau oleh petani (Piepho et al., 2016). Perakitan kultivar padi yang mempunyai hasil tinggi dan adaptif terhadap berbagai kondisi lingkungan merupakan salah satu upaya untuk meningkatkan produktivitas padi. Pemuliaan varietas padi khususnya toleran terhadap cekaman kekeringan menawarkan opsi yang layak secara ekonomi dan berkelanjutan untuk meningkatkan produktivitas padi (Pandey & Shukla, 2015). Pertimbangkan faktor-faktor seperti ketahanan terhadap kondisi aerobik, produktivitas yang tinggi, kebutuhan air yang sesuai dengan kondisi lokal, waktu pemanenan yang cocok dengan iklim, ketahanan terhadap hama dan penyakit, ketersediaan benih di wilayah Anda, serta konsultasi dengan petani lokal atau ahli pertanian. Pemuliaan varietas padi yang toleran terhadap cekaman kekeringan menawarkan opsi yang layak secara ekonomi dan berkelanjutan untuk meningkatkan produktivitas padi (Pandey & Shukla, 2015). Genetika molekuler dan karakterisasi dapat digunakan untuk seleksi padi yang toleran terhadap cekaman kekeringan. Genotipe baru ini dapat dieksplorasi dalam program pemuliaan melalui seleksi berbantuan marka untuk pengembangan varietas padi toleran kekeringan. International Rice Research Institute dalam dekade terakhir ini telah menggunakan pendekatan pemuliaan berbantuan marka untuk pengembangan kultivar padi yang toleran kekeringan. Beberapa marka molekuler yang digunakan meliputi

Random Amplified Polymorphic DNA (RAPD), Simple Sequence Repeat (SSR), Amplified Fragment Length Polymorphism (AFLP), dan Single Nucleotide Polymorphism (SNP) (Kumar et al., 2016; Sandhu & Kumar, 2017; Verma et al., 2019).

Indonesia memiliki beberapa varietas padi gogo yang dapat diaadaptasi secara khusus untuk sistem padi aerobik. Varietas ini memiliki kemampuan lebih baik untuk bertahan dalam lingkungan yang lebih kering dan lebih beroksigen. Perbedaan utama antara varietas sawah dan gogo adalah potensi hasil panennya. Varietas padi sawah dapat menghasilkan antara 5,5 dan 8,0 ton ha^{-1} , sedangkan varietas padi gogo dapat menghasilkan hingga 5,0 ton ha^{-1} (Panuju et al., 2013). Diketahui bahwa varietas padi gogo 53,5% kurang menguntungkan dibandingkan varietas padi dataran rendah sehingga membuat petani enggan beralih ke sistem padi aerobik dengan varietas padi gogo (Nugroho et al., 2017), namun sistem padi aerobik akan mengurangi emisi gas metana sehingga petani harus diberikan manfaat ekonomi sebagai kompensasi kerugian akibat berkurangnya hasil panen dengan skema pembelian karbon.

Di Indonesia, saat ini telah diperkenalkan beberapa varietas padi yang cocok untuk budi daya dalam sistem padi aerobik. Salah satu varietas terbaru adalah padi GAMAGORA 7, yang baru dirilis oleh Fakultas Pertanian di Universitas Gadjah Mada pada bulan Maret 2023. GAMAGORA 7 berasal dari hasil pemuliaan mutasi menggunakan cobalt-60 dosis 30 krad dari varietas lokal Rojolele asal Klaten, Jawa Tengah yang merupakan koleksi Laboratorium Pemuliaan Tanaman, Departemen Budi Daya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada. Seleksi *pedigree* pada populasi M2-M7 mengikuti kaidah *panicle to row* diikuti seleksi massa positif pada populasi M8-M10 menghasilkan galur 7-7-7-1-9-9-2. Padi GAMAGORA 7 ini memiliki karakteristik unik sebagai padi “amfibi,” yang dapat tumbuh baik di lahan sawah maupun lahan tada hujan dengan hasil yang sama baik. Penggunaan sistem padi aerobik dengan memanfaatkan varietas padi GAMAGORA 7 menawarkan potensi sebagai solusi untuk mengatasi penurunan produksi padi di Indonesia yang disebabkan oleh berbagai

faktor, termasuk perubahan iklim global, seperti El Niño dan La Niña, serta pengalihan fungsi lahan sawah ke nonsawah yang mencapai 96.512 hektare tahun⁻¹, sementara pencetakan sawah setiap tahunnya rata-rata 20–30 ribu hektare. Pada tahun 2045, lahan sawah diprediksi menyusut seluas 2,1 juta ha dan hanya tersisa 6 juta ha (Mulyani et al., 2017). Potensi produksi padi GAMAGORA 7 mencapai 9,80 ton ha⁻¹ GKG, melebihi rata-rata hasil padi sekitar 7,95 ton ha⁻¹ dengan umur panen sekitar 119 hari setelah penanaman. Keunggulan ini menjadikan padi GAMAGORA 7 sebagai alternatif yang menarik bagi petani dalam upaya meningkatkan produktivitas pertanian, terutama dalam konteks sistem padi aerobik yang makin relevan dalam menghadapi tantangan pertanian modern.

Sistem padi aerobik muncul sebagai alternatif yang menjanjikan untuk mengatasi tantangan kekurangan air dan krisis energi yang memengaruhi budi daya padi konvensional. Salah satu kendala utama yang dihadapi dalam menerapkan sistem ini adalah serangan gulma yang sering kali sangat intensif. Dengan memahami berbagai jenis gulma, kerugian hasil yang mungkin timbul, dan ancaman resistensi terhadap herbisida menjadi hal yang krusial dalam pengelolaan gulma dalam konteks padi aerobik. Data menunjukkan bahwa ada sekitar 90 spesies gulma yang bersaing dengan padi dalam sistem aerobik, yang berpotensi menyebabkan penurunan hasil gabah hingga mencapai 23%–100% (Jabran & Chauhan, 2015). Putranto (2012) memberikan informasi bahwa produktivitas padi pada kondisi aerob relatif lebih rendah akan tetapi secara statistik tidak berbeda nyata dibandingkan pada kondisi anaerob. Penurunan produksi padi di kondisi anaerob lebih disebabkan karena adanya kompetisi antara padi dengan gulma. Hal ini terkait dengan heterogenitas dan kelimpahan jenis gulma yang lebih tinggi pada kondisi aerob. Informasi lain menunjukkan bahwa terdapat peningkatan efisiensi penggunaan air dari 0,66 kg/m³ pada kondisi anaerob menjadi 0,71 kg/m³ pada kondisi aerob.

Praktik-praktik seperti solarisasi tanah, pemilihan varietas tanaman yang bersaing dengan gulma, persiapan benih yang sudah matang, penggunaan mulsa, aplikasi pupuk yang tepat, dan penerapan

tumpang sari telah terbukti memiliki peran penting dalam mengatasi masalah gulma dalam sistem padi aerobik. Selain itu, pendekatan manual, seperti penyiraman tangan dan metode pengendalian mekanis menjadi lebih efektif ketika digabungkan dengan pendekatan lain dalam pengendalian gulma. Pemanfaatan herbisida tertentu, seperti pendimethalin; 2,4-D; penoxsulam; ethoxysulfuron; bispyribac-sodium; triclopyr; imazosulfuron; bensulfuron; pretilachlor; dan met-sulfuron juga telah terbukti efektif dalam mengatasi masalah gulma dalam sistem padi aerobik. Mengingat tingkat serangan gulma yang kompleks dan kemungkinan evolusi resistensi terhadap herbisida, bergantung pada satu metode pengendalian tunggal bukanlah pilihan yang bijaksana. Oleh karena itu, pendekatan pengelolaan gulma terpadu menjadi pilihan yang paling rasional, memastikan adanya strategi yang holistik dalam menghadapi permasalahan gulma dan meningkatkan keberhasilan budi daya padi dalam sistem aerobik.

G. Tantangan dan Keterbatasan: Menavigasi Jalur Menuju Sistem Padi Aerobik di Indonesia

Meskipun penerapan sistem padi aerobik menjanjikan bagi pertanian berkelanjutan di Indonesia, kita harus menyadari bahwa menjalankan sistem ini tidaklah tanpa tantangan dan keterbatasan yang perlu diatasi. Perubahan dari sistem budi daya padi tradisional yang tergenang air ke sistem padi aerobik memerlukan adaptasi dan pelatihan bagi petani. Oleh karena itu, kita perlu untuk memberikan perhatian dan menawarkan strategi untuk mengatasi tantangan-tantangan ini, mengoptimalkan kinerja sistem, dan memastikan keberhasilan integrasi praktik padi aerobik ke dalam lanskap pertanian Indonesia.

Zona iklim Indonesia yang beragam memberikan tantangan pengelolaan air yang beragam bagi keberhasilan penerapan sistem padi aerobik. Pentingnya mengadaptasi sistem ini untuk mengakomodasi kondisi iklim yang beragam di seluruh negeri, di mana beberapa wilayah mengalami curah hujan yang tinggi sementara wilayah lainnya menghadapi kelangkaan air. Untuk mengatasi tantangan rumit ini diperlukan penerapan pendekatan cerdas iklim yang memberdayakan

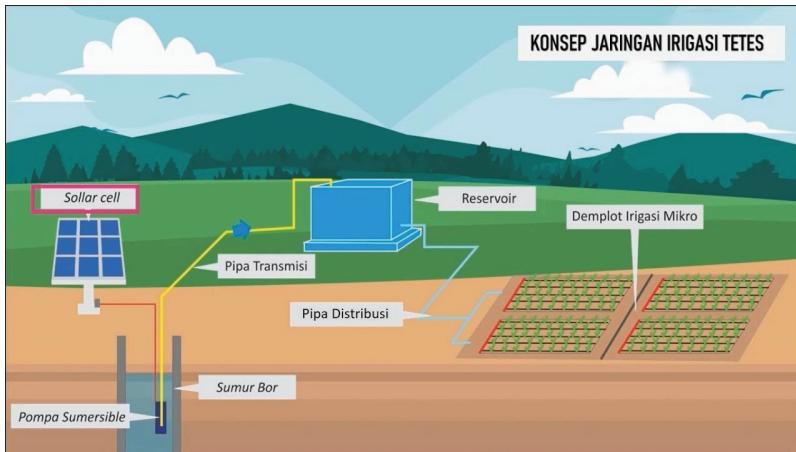
petani untuk menerapkan strategi irigasi yang fleksibel, memastikan kondisi aerobik yang optimal sekaligus melestarikan sumber daya air yang berharga.

Saat ini diperlukan pendekatan cerdas iklim dalam mengelola air secara efektif dalam sistem pertanian aerobik di berbagai iklim di Indonesia. Pendekatan ini bergantung pada pemanfaatan data cuaca secara *real-time* dan pemodelan prediktif, yang memungkinkan petani mengambil keputusan berdasarkan informasi terkait praktik irigasi. Dengan memanfaatkan kekuatan teknologi dan data, petani dapat menyesuaikan jadwal tanam, irigasi, dan penggunaan air sebagai respons terhadap perubahan pola cuaca. Hal ini dapat meminimalisasi terjadinya *crop failure* atau kegagalan panen akibat kesalahan dalam manajemen waktu budi daya khususnya jadwal tanam dan distribusi air. Pendekatan proaktif ini tidak hanya mengoptimalkan kondisi aerobik tetapi juga melestarikan sumber daya air sehingga berkontribusi terhadap pertanian berkelanjutan (Ramachandran et al., 2022).

Selain itu, sosialisasi teknologi hemat air memainkan peran penting dalam mengatasi tantangan pengelolaan air. Pentingnya memperkenalkan sistem irigasi yang efisien, seperti irigasi tetes dan teknik irigasi presisi, yang dapat mengurangi pemborosan air secara signifikan akibat efisiensi yang rendah di jaringan irigasi. Teknologi-teknologi ini sejalan dengan tujuan pertanian berkelanjutan yang lebih luas dengan mendorong penggunaan air yang bertanggung jawab. Memperluas pelatihan petani dan program peningkatan kapasitas merupakan aspek penting lainnya dalam mengelola air secara efektif dalam beragam iklim. Membekali masyarakat lokal dengan pengetahuan dan keterampilan yang diperlukan untuk menavigasi seluk-beluk pengelolaan air sangatlah penting. Dalam hal ini, koordinasi perkumpulan petani pemakai air (P3A) sebagai lembaga legal pengelola air dan penyuluh pertanian sangatlah penting guna meminimalisasi terjadinya defisit air antar-P3A melalui pelatihan maupun *focus group discussion* (FGD). Program-program ini memberdayakan petani untuk mengambil keputusan yang tepat mengenai praktik irigasi sehingga

memungkinkan mereka beradaptasi dengan kondisi iklim spesifik di wilayah mereka. Selain itu, mereka menumbuhkan rasa kepemilikan dan pengelolaan sumber daya air, serta mendorong pengelolaan air yang bertanggung jawab di tingkat akar rumput.

Upaya mencapai kondisi aerobik merupakan langkah penting untuk mengurangi emisi gas metana, namun hal ini memunculkan perdebatan dan memerlukan pertimbangan yang cermat terkait dengan dampak dan kebutuhan energi yang terlibat untuk mengan-
tisipasi terjadinya *trade-off* dan meningkatkan sinergi antarelemen. Penelitian terbaru telah secara khusus mengamati karakteristik intensif energi dari beberapa praktik, seperti irigasi yang terputus-putus dan aerasi tanah, yang menggarisbawahi pentingnya menyeimbangkan pengurangan gas metana dengan potensi peningkatan konsumsi energi (Yang et al., 2023). Dalam menghadapi kompleksitas ini, strategi untuk mengoptimalkan efisiensi energi menjadi makin penting. Hal ini meliputi pemanfaatan sumber energi terbarukan, peningkatan teknologi irigasi yang lebih efisien, dan pengembangan praktik input energi rendah yang bertujuan untuk mencapai pengurangan gas metana sekaligus meminimalkan kebutuhan energi (Gambar 12.3). Contoh lain, yaitu penggunaan air limbah dari produksi pangan untuk irigasi dapat mengurangi permintaan sumber daya air tawar sehingga menghasilkan penggunaan air yang lebih berkelanjutan atau pemanfaatan penggunaan ekosistem alami, seperti lahan basah atau penyangga tepi sungai, untuk menyaring dan menyimpan air sehingga dapat membantu mengurangi kebutuhan akan sistem pengolahan air yang mahal dan boros energi (Ansari, Wuryandani, et al., 2023). Dengan menggabungkan pendekatan ini, kita dapat merangkul tantangan energi yang ada sambil tetap memprioritaskan mitigasi perubahan iklim.



Sumber: PuslitbangKPT (2020)

Gambar 12.3 Konsep Jaringan Irrigasi Tetes Gravitasi Hemat Energi

Strategi untuk mengoptimalkan efisiensi energi sangat penting dalam memitigasi penggunaan energi. Salah satu cara yang menjanjikan adalah integrasi sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya dan angin, untuk memenuhi kebutuhan energi sistem padi aerobik (Javed et al., 2020). Penelitian terbaru menyoroti kelayakan pemanfaatan energi terbarukan untuk keperluan irigasi dan aerasi sehingga menawarkan solusi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan (Chakravarty et al., 2022). Selain itu, kemajuan teknologi irigasi memainkan peran penting dalam mengoptimalkan efisiensi energi. Sistem inovatif, termasuk irigasi presisi dan mekanisme kontrol otomatis, dapat meminimalkan konsumsi energi sekaligus memastikan kondisi aerobik tetap terjaga dengan baik. Teknologi ini tidak hanya mengurangi biaya terkait energi namun juga meningkatkan keberlanjutan sistem pertanian aerobik secara keseluruhan. Arahan penelitian dalam konteks ini mencakup pengembangan praktik input energi rendah yang disesuaikan dengan kebutuhan spesifik budi daya padi aerobik. Praktik-praktik ini bertujuan untuk mencapai pengurangan gas metana sekaligus meminimalkan kebutuhan energi, serta mencapai keseimbangan antara tanggung jawab terhadap lingkungan dan efisiensi energi.

H. Implikasi Kebijakan dan Arah Masa Depan Sistem Padi Aerobik di Indonesia

Menelaah lanskap kebijakan sangat penting untuk mendorong penerapan sistem padi aerobik secara luas di Indonesia, mendorong pertanian berkelanjutan, dan memitigasi perubahan iklim. Perlu adanya dukungan kebijakan yang komprehensif, insentif, dan kerangka peraturan untuk mempercepat transisi menuju budi daya padi yang bertanggung jawab terhadap lingkungan. Selain itu, diperlukan kemampuan mengidentifikasi bidang-bidang eksplorasi pada masa depan dan menggarisbawahi peran penting padi aerobik dalam mencapai tujuan pertanian berkelanjutan dan target mitigasi perubahan iklim di Indonesia.

Kita perlu mendorong para pembuat kebijakan untuk mengambil langkah-langkah proaktif, seperti memberikan subsidi, hibah, dan insentif keuangan, untuk memotivasi petani agar menerapkan praktik-praktik berkelanjutan ini. Insentif ini berfungsi sebagai penyelamat, membantu membiayai biaya awal yang terkait dengan penerapan teknologi dan metode inovatif, yang pada akhirnya menjadikan sistem padi aerobik lebih mudah diakses oleh beragam spektrum petani. Untuk mengkatalisasi transisi ke sistem padi aerobik, pembuat kebijakan dapat mempertimbangkan untuk memberikan insentif finansial yang secara langsung mendukung petani. Subsidi untuk pembelian peralatan dan teknologi yang penting untuk budi daya padi aerobik, seperti sistem irigasi hemat energi dan alat aerasi tanah, dapat menurunkan hambatan finansial untuk masuk secara signifikan. Bersamaan dengan insentif keuangan, pembentukan kerangka peraturan dan standar yang jelas sangat diperlukan. Kerangka kerja ini memberikan panduan dan jaminan kepada petani, memastikan penerapan sistem padi aerobik secara bertanggung jawab. Hal ini dapat mencakup pedoman untuk penilaian dampak lingkungan, pengelolaan sumber daya air, dan praktik pengelolaan nutrisi dan hama berkelanjutan dalam budi daya padi aerobik. Saat ini hanya terdapat Surat Edaran Tahun 2019 oleh Direktur Jenderal Sumber Daya Air Kementerian PUPR No.1/SE/D/2019 yang telah menjadi pedoman terbaru Modernisasi Irigasi

Indonesia. Surat edaran ini berisi pedoman modernisasi irigasi. Hal ini bertujuan untuk mencapai sistem pengelolaan irigasi partisipatif yang berorientasi pada pemenuhan irigasi secara efektif, efisien dan berkelanjutan, mendorong ketahanan pangan dan air melalui peningkatan penyediaan air, infrastruktur, pengelolaan irigasi, pengelolaan lembaga, dan sumber daya manusia. Strategi untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem irigasi melalui modernisasi irigasi meliputi hal-hal berikut.

- 1) pembangunan jaringan irigasi baru yang sangat efisien;
- 2) rehabilitasi jaringan irigasi yang ada;
- 3) peningkatan kapasitas kelembagaan irigasi;
- 4) meningkatkan efektivitas metode alokasi air irigasi; dan
- 5) pemanfaatan lahan suboptimal melalui revitalisasi rawa.

Selain surat edaran ini, Indonesia tampaknya enggan berinvestasi lebih banyak dalam membangun landasan hukum yang kuat karena belum ada peraturan menteri baru yang mengatur modernisasi irigasi.

Sistem padi aerobik harus dapat beradaptasi dengan berbagai zona agroekologi di Indonesia, yang masing-masing memiliki karakteristik iklim, tanah, dan kondisi lingkungan yang unik. Penelitian harus fokus pada penyesuaian sistem ini pada wilayah tertentu, dengan mempertimbangkan faktor-faktor, seperti pola curah hujan, variasi suhu, dan profil tanah. Mengembangkan praktik dan pedoman padi aerobik spesifik wilayah memastikan bahwa petani dapat menerapkan metode ini dengan sukses dalam konteks agroekologi yang beragam. Selanjutnya, upaya penelitian harus diarahkan pada pemuliaan dan pemilihan varietas padi yang adaptif terhadap perubahan iklim, stabil, dan memiliki daya hasil tinggi dalam kondisi aerobik dan memberikan hasil tinggi. Varietas ini harus menunjukkan ketahanan terhadap faktor stres yang terkait dengan budi daya aerobik, seperti tingkat kelembapan tanah yang berfluktuasi. Perbaikan genetik dapat berdampak signifikan terhadap keberhasilan sistem padi aerobik dengan menyediakan varietas tanaman yang optimal bagi petani untuk metode budi daya secara aerobik. Selain itu, penelitian pada

masa depan harus menggali lebih dalam mengenai optimalisasi efisiensi energi untuk mengurangi pemborosan energi yang terkait dengan praktik intensif energi, seperti irigasi berselang dan aerasi tanah. Mengeksplorasi sumber energi terbarukan, teknologi irigasi inovatif, dan praktik input energi rendah dapat membantu mencapai keseimbangan antara pengurangan gas metana dan konsumsi energi sehingga menjadikan sistem padi aerobik lebih berkelanjutan dan hemat biaya. Semua hal tersebut harus didukung dengan penelitian kolaboratif yang melibatkan institusi akademis, petani, dan sektor swasta sangat penting dalam mendorong inovasi dan mengatasi kesenjangan penelitian. Pendekatan kolaboratif ini mendorong pertukaran pengetahuan, memungkinkan pengujian praktik di lapangan, dan memfasilitasi penyebaran cepat strategi-strategi yang berhasil kepada komunitas petani.

Pentingnya sistem padi aerobik dalam tujuan pertanian berkelanjutan dan upaya mitigasi perubahan iklim di Indonesia tidak dapat dilebih-lebihkan. Kita harus menyadari potensi besar sistem ini dalam mengurangi emisi gas metana, melestarikan sumber daya air yang penting dan mendorong pengelolaan unsur hara dan hama yang bertanggung jawab. Penting bagi para pengambil kebijakan untuk mengakui beras aerobik sebagai komponen penting dalam strategi Indonesia untuk mencapai target pertanian berkelanjutan dan berkontribusi terhadap komitmen iklim internasional. Menyelaraskan kebijakan dengan tujuan-tujuan ini menempatkan Indonesia sebagai pemimpin dalam penanaman padi yang bertanggung jawab, yang mendorong dampak positif terhadap lingkungan dan ketahanan pangan.

I. Sistem Padi Aerobik: Jalan Menuju Pertanian Berkelanjutan dan Pengurangan Emisi di Indonesia

Eksplorasi sistem padi aerobik dalam konteks pertanian Indonesia menggarisbawahi jalur transformatif menuju budi daya padi yang berkelanjutan dan sadar lingkungan. Temuan penelitian terbaru me-

nekankan potensi besar dari sistem ini tidak hanya untuk memajukan pertanian berkelanjutan namun juga secara signifikan mengurangi emisi gas rumah kaca. Potensi transformatif ini muncul sebagai solusi multifaset terhadap tantangan-tantangan penting yang dihadapi Indonesia, mulai dari isu ketahanan pangan, pengelolaan air yang bertanggung jawab hingga mitigasi perubahan iklim.

Sistem padi aerobik melambangkan praktik pertanian berkelanjutan yang holistik melalui pengurangan emisi gas metana, penggunaan air yang bijaksana, pengelolaan unsur hara dan hama yang tepat, dan teknik yang hemat energi. Sistem ini tidak hanya menawarkan jalan untuk meningkatkan hasil panen dan kelangsungan ekonomi, tetapi juga menjamin kesehatan ekosistem dan tanah dalam jangka panjang. Yang terpenting, mereka mempunyai kekuatan untuk melakukan mitigasi perubahan iklim dengan mengurangi emisi gas metana secara signifikan, sejalan dengan komitmen iklim internasional Indonesia. Saat kami menyelesaikan eksplorasi ini, seruan kolektif untuk bertindak bergema, mendesak penelitian berkelanjutan, kerangka kebijakan yang mendukung, dan penerapan praktis secara luas. Upaya penelitian kolaboratif harus terus dilakukan untuk mengatasi kesenjangan pengetahuan dan mengoptimalkan teknologi. Para pengambil kebijakan harus memperjuangkan kebijakan, termasuk insentif dan peraturan, yang mendorong penerapan sistem padi aerobik. Di tingkat akar rumput, perluasan program diseminasi pengetahuan dan peningkatan kapasitas akan memberdayakan petani melalui penyuluhan pertanian menjadi kunci keberhasilan transfer ilmu untuk menerapkan pendekatan pertanian transformatif ini. Potensi sistem pertanian aerobik dalam membentuk kembali lanskap pertanian Indonesia, mendorong keberlanjutan, dan mengurangi emisi gas rumah kaca sangatlah besar. Sistem ini tidak hanya menandai upaya ilmiah, tetapi juga cetak biru masa depan pertanian Indonesia yang lebih berkelanjutan dan bertanggung jawab terhadap lingkungan. Dengan di sebarluaskannya sistem padi aerobik ini diharapkan dapat menjadi wadah terciptanya lingkungan yang sehat, meningkatnya kesejahteraan petani, serta terwujudnya sistem pertanian yang berkelanjutan.

Referensi

- Abbas, A., Waseem, M., Ahmad, R., khan, K. A., Zhao, C., & Zhu, J. (2022). Sensitivity analysis of greenhouse gas emissions at farm level: case study of grain and cash crops. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(54), 82559–82573. <https://doi.org/10.1007/S-11356-022-21560-9/FIGURES/1>
- ADB. (2023, Oktober 18). *How can we incentivize reducing methane emission in rice farming in Asia?* Asian Development Bank. <https://www.adb.org/news/events/how-can-we-incentivize-reducing-methane-emission-rice-farming-asia>
- Adhya, T. K., Linquist, B., Searchinger, Reiner Wassmann, T., & Yan, X. (2014). *Wetting and drying: Reducing greenhouse gas emissions and saving water from rice production.* World Resources Institute. <https://www.wri.org/research/wetting-and-drying-reducing-greenhouse-gas-emissions-and-saving-water-rice-production>
- Ahmed, M., Fayyaz-ul-Hassan, & Ahmad, S. (2017). Climate variability impact on rice production: Adaptation and mitigation strategies. Dalam *Quantification of climate variability, adaptation and mitigation for agricultural sustainability* (91–111). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32059-5_5
- Alam, T., Suryanto, P., Supriyanta, Basunanda, P., Wulandari, R. A., Kastono, D., Widyawan, M. H., Nurmansyah, & Taryono. (2021). Rice cultivar selection in an agroforestry system through GGE-biplot and EBLUP. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22(11), 4750–4757. <https://doi.org/10.13057/BIODIV/D221106>
- Ansari, A., Pranesti, A., Telaumbanua, M., Alam, T., Taryono, Wulandari, R. A., Nugroho, B. D. A., & Supriyanta. (2023). Evaluating the effect of climate change on rice production in Indonesia using multimodelling approach. *Helijon*, 9(9), e19639. <https://doi.org/10.1016/J.HELION.2023.E19639>
- Ansari, A., Wuryandani, S., Pranesti, A., Telaumbanua, M., Ngadisih, N., Hardiansyah, M. Y., Alam, T., Supriyanta, N., Martini, T., & Taryono, N. (2023). Optimizing water-energy-food nexus: achieving economic prosperity and environmental sustainability in agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1207197>

- Aparicio, J. D., Raimondo, E. E., Saez, J. M., Costa-Gutierrez, S. B., Álvarez, A., Benimeli, C. S., & Polti, M. A. (2022). The current approach to soil remediation: A review of physicochemical and biological technologies, and the potential of their strategic combination. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107141. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2022.107141>
- Brust, G. E. (2019). Management strategies for organic vegetable fertility. Dalam *Safety and practice for organic food* (193–212). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812060-6.00009-X>
- Burak, S., & Margat, J. (2016). Water management in the Mediterranean region: Concepts and policies. *Water Resources Management*, 30(15), 5779–5797. <https://doi.org/10.1007/S-11269-016-1389-4/TABLES/5>
- Chakravarty, K. H., Sadi, M., Chakravarty, H., Alsagri, A. S., Howard, T. J., & Arabkoohsar, A. (2022). A review on integration of renewable energy processes in vapor absorption chiller for sustainable cooling. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101822. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101822>
- Chu, G., Wang, Z., Zhang, H., Liu, L., Yang, J., & Zhang, J. (2015). Alternate wetting and moderate drying increases rice yield and reduces methane emission in paddy field with wheat straw residue incorporation. *Food and Energy Security*, 4(3), 238–254. <https://doi.org/10.1002/FES-3.66>
- dos Santos Cordeiro, C. F., Rodrigues, D. R., da Silva, G. F., Echer, F. R., & Calonego, J. C. (2022). Soil organic carbon stock is improved by cover crops in a tropical sandy soil. *Agronomy Journal*, 114(2), 1546–1556. <https://doi.org/10.1002/AGJ2.21019>
- Datta, A., Ullah, H., & Ferdous, Z. (2017). Water management in rice. *Rice Production Worldwide*, 255–277. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47516-5_11/COVER
- EPA. (2021). *Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks*. <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks>
- Fan, Y., Tian, Z., Wang, K., & Fan, D. (2021). Simulation of water saving and methane mitigation potential of paddy fields under alternate wetting and drying irrigation regime in China. Dalam *2021 9th international conference on agro-geoinformatics (AGRO-GEOINFORMATICS 2021)*. <https://doi.org/10.1109/AGRO-GEOINFORMATICS50104.2021.9530342>

- FAOSTAT. (2023). *Climate change: Agrifood systems emissions - Emissions totals*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#compare>
- Guo, Y., Zhang, G., Abdalla, M., Kuhnert, M., Bao, H., Xu, H., Ma, J., Begum, K., & Smith, P. (2023). Modelling methane emissions and grain yields for a double-rice system in Southern China with DAYCENT and DNDC models. *Geoderma*, 431. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2023.116364>
- Helmi, H., Zakaria, S., Efendi, Munawar, A. A., & Aulia, R. (2021). Effect of irrigation methods and testing some rice cultivars against growth, root development and yield on rainfed Ultisols of Aceh Besar. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 922, Article 012044). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/922/1/012044>
- Heredia, M. C., Kant, J., Prodhan, M. A., Dixit, S., & Wissuwa, M. (2021). Breeding rice for a changing climate by improving adaptations to water saving technologies. *Theoretical and Applied Genetics* 2021 135:1, 135(1), 17–33. <https://doi.org/10.1007/S00122-021-03899-8>
- Hussain, S., Huang, J., Huang, J., Ahmad, S., Nanda, S., Anwar, S., Shakoor, A., Zhu, C., Zhu, L., Cao, X., Jin, Q., & Zhang, J. (2020). Rice production under climate change: Adaptations and mitigating strategies. Dalam *Environment, climate, plant and vegetation growth* (659–686). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_26_COVER
- Ishfaq, M., Farooq, M., Zulfiqar, U., Hussain, S., Akbar, N., Nawaz, A., & Anjum, S. A. (2020). Alternate wetting and drying: A water-saving and ecofriendly rice production system. *Agricultural Water Management*, 241, 106363. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106363>
- Islam, S. M. M., Gaihre, Y. K., Islam, M. R., Ahmed, M. N., Akter, M., Singh, U., & Sander, B. O. (2022). Mitigating greenhouse gas emissions from irrigated rice cultivation through improved fertilizer and water management. *Journal of Environmental Management*, 307, 114520. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.114520>
- Jabran, K., & Chauhan, B. S. (2015). Weed management in aerobic rice systems. *Crop Protection*, 78, 151–163. <https://doi.org/10.1016/J.CROP.2015.09.005>

- Javed, M. S., Ma, T., Jurasz, J., & Amin, M. Y. (2020). Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: Review and future perspectives. *Renewable Energy*, 148, 176–192. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.11.157>
- Jiang, M., Xu, P., Wu, L., Zhao, J., Wu, H., Lin, S., Yang, T., Tu, J., & Hu, R. (2022). Methane emission, methanogenic and methanotrophic communities during rice-growing seasons differ in diversified rice rotation systems. *Science of The Total Environment*, 842, 156781. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.156781>
- Kumar, A., Basu, S., Ramegowda, V., & Pereira, A. (2016). Mechanisms of drought tolerance in rice . Dalam T. Sasaki (Ed.), *Achieving sustainable cultivation of rice* (Vol. 1, 153–186). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.4324/9781351114189-9>
- Lampayan, R. M., Rejesus, R. M., Singleton, G. R., & Bouman, B. A. M. (2015). Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for irrigated lowland rice. *Field Crops Research*, 170, 95–108. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2014.10.013>
- Lan, X., Thoning, K. W., & Dlugokencky, E. J. (2022). *Trends in globally averaged CH₄, N₂O, and SF₆*. NOAA Global Monitoring Laboratory. <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>
- Lin, Y.-P., Ansari, A., Ngoc-Dan Cao, T., Shiau, Y.-J., Lur, H.-S., Muzaffar, A., Wunderlich, R. F., & Mukhtar, H. (2022). Using inhibitors to trade greenhouse gas emission for ammonia losses in paddy soil: A zero-sum game. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102547. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102547>
- Linquist, B. A., Anders, M. M., Adviento-Borbe, M. A. A., Chaney, R. L., Nalley, L. L., da Rosa, E. F. F., & van Kessel, C. (2015). Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems. *Global Change Biology*, 21(1), 407–417. <https://doi.org/10.1111/GCB.12701>
- Luo, D., Yu, H., Li, Y., Yu, Y., Chapman, S. J., & Yao, H. (2023). A joint role of iron oxide and temperature for methane production and methanogenic community in paddy soils. *Geoderma*, 433, 116462. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2023.116462>
- Maharjan, G. R., Prescher, A. K., Nendel, C., Ewert, F., Mboh, C. M., Gaiser, T., & Seidel, S. J. (2018). Approaches to model the impact of tillage implements on soil physical and nutrient properties in different agro-ecosystem models. *Soil and Tillage Research*, 180, 210–221. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2018.03.009>

- Maneepitak, S., Ullah, H., Datta, A., Shrestha, R. P., Shrestha, S., & Kachenchart, B. (2019). Effects of water and rice straw management practices on water savings and greenhouse gas emissions from a double-rice paddy field in the Central Plain of Thailand. *European Journal of Agronomy*, 107, 18–29. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2019.04.002>
- Maneepitak, S., Ullah, H., Paothong, K., Kachenchart, B., Datta, A., & Shrestha, R. P. (2019). Effect of water and rice straw management practices on yield and water productivity of irrigated lowland rice in the Central Plain of Thailand. *Agricultural Water Management*, 211, 89–97. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2018.09.041>
- Marpaung, I. S., Sipahutar, T., Siagian, D. R., & P., T. (2021). Teknologi tanaman padi sistem tanam benih langsung dengan hambur di dataran tinggi Sumatera Utara (studi kasus di Kabupaten Humbang Hasundutan). *Proceedings Series on Physical & Formal Sciences*, 2, 344–351. <https://doi.org/10.30595/PSPFS.V2I.209>
- Matthews, R. B., Wassmann, R., & Arah, J. (2000). Using a crop/soil simulation model and GIS techniques to assess methane emissions from rice fields in asia. I. Model development. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 58(1–3), 141–159. [https://doi.org/10.1023/A:1009894619446/METRICS](https://doi.org/10.1023/A:1009894619446)
- Mehra, P., Baker, J., Sojka, R. E., Bolan, N., Desbiolles, J., Kirkham, M. B., Ross, C., & Gupta, R. (2018). A review of tillage practices and their potential to impact the soil carbon dynamics. *Advances in Agronomy*, 150, 185–230. <https://doi.org/10.1016/BS.AGRON.2018.03.002>
- Mukhtar, H., Wunderlich, R. F., Muzaffar, A., Ansari, A., Shipin, O. V., Cao, T. N.-D., & Lin, Y.-P. (2023). Soil microbiome feedback to climate change and options for mitigation. *Science of The Total Environment*, 882, 163412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163412>
- Mulyani, A., Nursyamsi, D., & Syakir, M. (2017). Strategi pemanfaatan sumberdaya lahan untuk pencapaian swasembada beras berkelanjutan. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 11(1), 223337. <https://doi.org/10.2018/JSDL.V11I1.8187>
- Netafim. (2023). *Increase rice yield using drip irrigation*. <https://www.netafimindia.com/crop-knowledge/rice/>
- Nugroho, K., Slamet, S., & Lestari, P. (2017). Keragaman genetik 24 varietas padi sawah dan padi gogo (*Oryza sativa* L.) Indonesia berdasarkan marka SSR. *Scripta Biologica*, 4(1), 5–10. <https://doi.org/10.20884/1.SB.2017.4.1.350>

- Pandey, V., & Shukla, A. (2015). Acclimation and tolerance strategies of rice under drought stress. *Rice Science*, 22(4), 147–161. <https://doi.org/10.1016/J.RSCI.2015.04.001>
- Panuju, D. R., Mizuno, K., & Trisasongko, B. H. (2013). The dynamics of rice production in Indonesia 1961–2009. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 12(1), 27–37. <https://doi.org/10.1016/J.JSSAS.2012.05.002>
- Peyron, M., Bertora, C., Pelissetti, S., Said-Pullicino, D., Celi, L., Miniotti, E., Romani, M., & Sacco, D. (2016). Greenhouse gas emissions as affected by different water management practices in temperate rice paddies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 232, 17–28. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2016.07.021>
- Piepho, H. P., Nazir, M. F., Qamar, M., Rattu, A. U. R., Riaz-Ud-Din, Hussain, M., Ahmad, G., Fazal-E-Subhan, Ahmad, J., Abdullah, Laghari, K. B., Vistro, I. A., Sharif Kakar, M., Sial, M. A., & Imtiaz, M. (2016). Stability analysis for a countrywide series of wheat trials in Pakistan. *Crop Science*, 56(5), 2465–2475. <https://doi.org/10.2135/CROPSCI2015.12.0743>
- Pratiwi, E. P. A., & Shinogi, Y. (2016). Rice husk biochar application to paddy soil and its effects on soil physical properties, plant growth, and methane emission. *Paddy and Water Environment*, 14(4), 521–532. <https://doi.org/10.1007/S-10333-015-0521-Z/FIGURES/9>
- Pratiwi, E., Akhdya, A., Purwani, J., Husnain, & Syakir, M. (2021). Impact of methane-utilizing bacteria on rice yield, inorganic fertilizers efficiency and methane emissions. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 924, Article 012017). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/648/1/012137>.
- PuslitbangKPT. (2020, 27 Januari). *Teknologi irigasi tetes (irigasi hemat air)* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=6iied70eK4c>
- Putranto, A. W. (2012). *Optimasi potensi hasil berbagai varietas padi (Oryza sativa L.) melalui pengaturan populasi dan pemupukan nitrogen pada dua kondisi pengairan* [Tesis]. Universitas Gadjah Mada. <https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/56491>

- Ramachandran, V., Ramalakshmi, R., Kavin, B. P., Hussain, I., Almaliki, A. H., Almaliki, A. A., Elnagar, A. Y., Hussein, E. E., Li, Z., Fan, Y., Augusto, C., Santos, G., Jin, J., Ramachandran, V., Ramalakshmi, R., Kavin, B. P., Hussain, I., Almaliki, A. H., Almaliki, A. A., ... Hussein, E. E. (2022). Exploiting IoT and its enabled technologies for irrigation needs in agriculture. *Water*, 14(5), 719. <https://doi.org/10.3390/W14050719>
- Ritung, S., Suryani, E., Subardja, D., Sukarman, Nugroho, K., Suparto, Hikmatullah, Mulyani, A., Tafakresnanto, C., Sulaeman, Y., Subandiono, R. E., Wahyunto, Ponidi, Prasodjo, N., Suryana, U., Hidayat, H., Priyono, A., & Supriatna, W. (2015). *Sumber daya lahan pertanian Indonesia: Luas, penyebaran, dan potensi ketersediaan* (E. Husen, F. Agus, & D. Nursyamsi, Ed.). IAARD Press. <https://repository.pertanian.go.id/handle/123456789/20044>
- Sandhu, N., & Kumar, A. (2017). Bridging the rice yield gaps under drought: QTLs, genes, and their use in breeding programs. *Agronomy*, 7(2), 27. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY7020027>
- Sapkota, A., Haghverdi, A., Avila, C. C. E., & Ying, S. C. (2020). Irrigation and greenhouse gas emissions: A review of field-based studies. *Soil Systems*, 4(2), 20. <https://doi.org/10.3390/SOILSYSTEMS4020020>
- Setyanto, P., Pramono, A., Adriany, T. A., Susilawati, H. L., Tokida, T., Padre, A. T., & Minamikawa, K. (2018). Alternate wetting and drying reduces methane emission from a rice paddy in Central Java, Indonesia without yield loss. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64(1), 23–30. <https://doi.org/10.1080/00380768.2017.1409600>
- Sharma, S. K., Singh, Y. V., Tyagi, S., & Bhatia, A. (2016). Influence of rice varieties, nitrogen management and planting methods on methane emission and water productivity. *Paddy and Water Environment*, 14(2), 325–333. <https://doi.org/10.1007/S-10333-015-0502-2/TABLES/4>
- Singh, S. (2021). Energy crisis and climate change. Dalam *Energy: Crises, challenges and solutions* (1–17). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119741503.CH1>
- Subrata, B. A. G., Yudono, P., Waluyo, S., & Putra, E. T. S. (2016). *Pengaruh proporsi populasi padi gogo dan kacang hijau dalam tumpangsari terhadap hasil dan komposisi gulma di lahan pasir pantai* [Tesis]. Universitas Gadjah Mada. <https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/103173>

- Surendran, U., Raja, P., Jayakumar, M., & Subramoniam, S. R. (2021). Use of efficient water saving techniques for production of rice in India under climate change scenario: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 309, 127272. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127272>
- Suryanto, P., Kurniasih, B., Faridah, E., Nurjanto, H. H., Rogomulyo, R., Handayani, S., Kastono, D., Muttaqien, A. S., & Alam, T. (2020). Influence of furrow with organic material and Chromolaena odorata compost on upland rice productivity in an agroforestry system with Melaleuca cajuputi. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 21(2), 780–791. <https://doi.org/10.13057/BIODIV/D210246>
- Susilawati, H. L., Setyanto, P., Kartikawati, R., & Sutriadi, M. T. (2019). The opportunity of direct seeding to mitigate greenhouse gas emission from paddy rice field. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 393, Artikel 012042). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/393/1/012042>.
- Tao, Y., Zhang, Y., Jin, X., Saiz, G., Jing, R., Guo, L., Liu, M., Shi, J., Zuo, Q., Tao, H., Butterbach-Bahl, K., Dittert, K., & Lin, S. (2015). More rice with less water – evaluation of yield and resource use efficiency in ground cover rice production system with transplanting. *European Journal of Agronomy*, 68, 13–21. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2015.04.002>
- Toorn, S. a. D., Worrell, E., & Van Den Broek, M. (2021). How much can combinations of measures reduce methane and nitrous oxide emissions from European livestock husbandry and feed cultivation? *Journal of Cleaner Production*, 304, 127138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127138>
- Ullah, H., & Datta, A. (2018). Root system response of selected lowland Thai rice varieties as affected by cultivation method and potassium rate under alternate wetting and drying irrigation. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(14), 2045–2059. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1476756>
- Verma, H., Borah, J. L., & Sarma, R. N. (2019). Variability assessment for root and drought tolerance traits and genetic diversity analysis of rice germplasm using SSR Markers. *Scientific Reports*, 9(1), 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52884-1>

- Viandari, N. A., Adriany, T. A., & Pramono, A. (2020). Alternate wetting and drying system (AWD) combined with farmyard manure to increase rice yield and reduce methane emission and water use. Dalam *IOP conference series: Materials science and engineering* (Vol. 980, Artikel 012066). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/980/1/012066>
- Vishwakarma, P., & Dubey, S. K. (2020). Diversity of endophytic bacterial community inhabiting in tropical aerobic rice under aerobic and flooded condition. *Archives of Microbiology*, 202(1), 17–29. <https://doi.org/10.1007/S00203-019-01715-Y/FIGURES/6>
- Wang, H., Zhang, Y., Zhang, Y., McDaniel, M. D., Sun, L., Su, W., Fan, X., Liu, S., & Xiao, X. (2020). Water-saving irrigation is a ‘win-win’ management strategy in rice paddies – With both reduced greenhouse gas emissions and enhanced water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 228, 105889. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.105889>
- Wijaya, S. (2019). Indonesian food culture mapping: A starter contribution to promote Indonesian culinary tourism. *Journal of Ethnic Foods*, 6(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/S42779-019-0009-3/TABLES/1>
- Xu, Y., Ge, J., Tian, S., Li, S., Nguy-Robertson, A. L., Zhan, M., & Cao, C. (2015). Effects of water-saving irrigation practices and drought resistant rice variety on greenhouse gas emissions from a no-till paddy in the central lowlands of China. *Science of The Total Environment*, 505, 1043–1052. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.10.073>
- Yang, Y., Jin, Z., Mueller, N. D., Driscoll, A. W., Hernandez, R. R., Grodsky, S. M., Sloat, L. L., Chester, M. V., Zhu, Y. G., & Lobell, D. B. (2023). Sustainable irrigation and climate feedbacks. *Nature Food*, 4(8), 654–663. <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00821-x>
- Zhuang, Y., Zhang, L., Li, S., Liu, H., Zhai, L., Zhou, F., Ye, Y., Ruan, S., & Wen, W. (2019). Effects and potential of water-saving irrigation for rice production in China. *Agricultural Water Management*, 217, 374–382. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.03.010>

Bab XIII

Peran Sains dan Teknologi Atmosfer dalam Upaya Mewujudkan Ketahanan Pangan dan Pertanian Berkelanjutan Menghadapi Perubahan Iklim

Ibnu Fathrio, Danang Eko Nuryanto

A. Menggali Kembali Berbagai Implikasi Perubahan Iklim

Dampak perubahan iklim merupakan ancaman nyata bagi sektor pertanian. Perubahan pola dan intensitas curah hujan telah menjadi sebuah gangguan terhadap pola-pola tanam dan panen yang telah lama dijalankan oleh para petani Indonesia. Seiring dengan terjadinya pemanasan global hal ini akan melahirkan variabilitas ENSO yang lebih kuat, artinya musim kering (basah) yang identik dengan El Niño (La Niña) diprediksi akan hadir dengan intensitas lebih kuat dari sebelumnya (Cai et al., 2021). Laporan IPCC (2021) juga memprediksi kejadian cuaca ekstrem akan makin sering terjadi dan intens. Hal tersebut dapat menjadi ancaman bagi ketahanan pangan nasional di

I. Fathrio dan D. E. Nuryanto

Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail:* ibnufathrio@yahoo.com

© 2024 Editor & Penulis

Fathrio, I., & Nuryanto, D. E. (2024). Peran sains dan teknologi atmosfer dalam upaya mewujudkan ketahanan pangan dan pertanian berkelanjutan menghadapi perubahan iklim. Dalam D. E. Nuryanto & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (393–405). Penerbit BRIN.

DOI: 10.55981/brin.1244.c1397. E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

mana bencana banjir dan kekeringan dapat merusak lahan pertanian. Bertambah/berkurangnya curah hujan di suatu waktu dan tempat dari keadaan normal juga akan mengganggu fase pertumbuhan tanaman, seperti pada padi, jagung, gandum umumnya memiliki kebutuhan air yang berbeda pada tiap fase pertumbuhannya. El Niño menyebabkan penurunan curah hujan dan membuat musim kemarau datang lebih cepat dan durasi yang lebih lama. Penurunan produksi padi di NTT terjadi pada tahun 2023 yang diakibatkan oleh berkurangnya luas tanam padi dan jagung akibat kekeringan yang diakibatkan El Niño pada tahun 2023.

Banjir, kekeringan, dan pola hujan yang tidak teratur sebagai efek dari perubahan iklim telah memengaruhi sekitar 30% hasil panen di berbagai skala geografis (Lesk et al., 2016). Hal ini tentunya menimbulkan kekhawatiran besar atas ketersediaan pangan masa depan. Tidak hanya Indonesia, dari penelitian yang dilakukan Sekhar (2018) disimpulkan bahwa wilayah Asia Tenggara secara keseluruhan mengalami perubahan pola curah hujan yang berdampak negatif pada 50% hasil panen padi. Hasil penelitian Malau et al. (2021) juga menunjukkan dampak El Niño yang lebih signifikan terhadap harga pangan dibandingkan La Niña pada harga beras, ubi jalar, dan kacang hijau. Dalam laporan yang dibuat oleh FAO pun, secara tegas disebutkan bahwa meningkatnya frekuensi dan intensitas kekeringan dan banjir memiliki dampak yang menghancurkan pada ketahanan pangan dan mata pencarian di beberapa bagian dunia (FAO, 2021).

Kesadaran akan bahaya dampak-dampak perubahan iklim terhadap keberlanjutan kehidupan, terutama yang menyangkut ketahanan pangan, seluruh negara di dunia, termasuk Indonesia, mengembangkan berbagai konsep dan strategi sebagai bentuk mitigasi dan adaptasi. Penilaian kerentanan, merupakan langkah awal yang mutlak harus dilakukan untuk dapat memahami area, populasi, dan sektor mana yang paling rentan terhadap peristiwa ekstrem, seperti banjir, kekeringan, ataupun gelombang panas. Hal tersebut dilakukan dengan dukungan data, baik data historis, maupun data model iklim untuk memprediksi skenario iklim pada masa mendatang dan

dampak potensialnya. Dengan adanya informasi tingkat kerentanan, para pengambil kebijakan dapat menentukan kebutuhan infrastruktur yang harus dikembangkan untuk menahan peristiwa cuaca ekstrem, termasuk infrastruktur hijau yang merupakan gabungan solusi alama seperti lahan basah, atap hijau, ataupun hutan kota untuk mengurangi dampak perubahan iklim. Tentunya, pengembangan infrastruktur tersebut tidak lepas dari keterlibatan masyarakat serta bingkai kebijakan dan sistem regulasi. Berbagai teknologi pun dikembangkan untuk mendukung upaya-upaya mitigasi dan adaptasi dampak perubahan iklim.

Untuk beradaptasi terhadap dampak cuaca ekstrem, perubahan iklim, musim, dan fenomena antartahun seperti El Niño dan La Niña, diperlukan pemahaman lebih baik mengenai fenomena ini. Seiring dengan perkembangan teknologi di bidang sains atmosfer dan iklim, khususnya dalam bidang pengindraan jauh dan teknologi komputasi, fenomena atmosfer ini dapat diamati dan diprediksi dengan lebih baik. Teknologi pengindraan jauh dan model iklim yang makin canggih memudahkan kita untuk dapat melakukan pengamatan dan prediksi nilai suhu permukaan laut yang merupakan proxy dari status ENSO yang sedang terjadi, apakah ENSO netral atau menguat/melemah menjadi kondisi El Niño atau La Niña. Status ENSO tersebut direpresentasikan dalam bentuk indeks, antara lain indeks Nino 1+2, indeks NINO 3.4, Ocean Nino Indeks (ONI), Southern Oscillation indeks (SOI). Penelitian sebelumnya telah banyak mengaitkan korelasi kondisi El Niño dan La Niña, yang direpresentasikan dalam indeks ENSO dengan produksi tanaman pangan. Cao et al. (2023) juga menyebutkan bahwa dengan memanfaatkan sinyal awal ENSO kita dapat memprediksi sekitar seperempat dari variasi hasil panen dapat diprediksi menggunakan indeks ENSO. Boer dan Surmaini (2018) menggunakan informasi fase indeks SOI sebelum musim tanam yang dapat membantu petani untuk mengambil keputusan. Hal ini telah ditunjukkan dari meningkatnya hasil tani di daerah Kabupaten Bandung setelah menerapkan informasi dari indeks SOI tersebut.

Dalam proses menemukan langkah-langkah mitigasi dan adaptasi terhadap dampak-dampak perubahan iklim, beberapa peneliti dapat mencermati adanya sisi positif dari kejadian ENSO ataupun kejadian ekstrem lainnya yang dapat dimanfaatkan. Di beberapa wilayah, suhu yang lebih hangat dapat menyebabkan musim tanam yang lebih panjang sehingga berpotensi meningkatkan produktivitas pertanian. Selain itu, tingkat karbon dioksida yang lebih tinggi dapat meningkatkan fotosintesis, yang berarti terdapat potensi untuk dapat meningkatkan hasil panen. Beberapa tanaman mungkin menjadi lebih tahan terhadap kekeringan karena peningkatan kadar karbon dioksida tersebut. Pada Bab II telah diuraikan sisi positif dari ENSO yang dapat dimanfaatkan sebagai upaya adaptasi perubahan iklim. Penulis menunjukkan bahwa pada saat kondisi curah hujan berlebih (La Niña), terdapat peluang untuk penambahan luas area panen untuk tanaman-tanaman pangan yang membutuhkan air banyak. Jadi, meskipun produktivitas panen per luas lahan karena luas lahannya mengalami peningkatan, produksi secara keseluruhan dapat dipertahankan, atau bahkan ditingkatkan. Sebaliknya, ketika kondisi kering ekstrem yang terjadi saat El Niño, dapat terjadi juga penambahan luas lahan untuk pertanian, terutama untuk tanaman yang biasa hidup di lahan kering dan hanya bergantung pada curah hujan. Peningkatan luas panen pajale (padi, jagung, dan kedelai), ubi kayu pada masa La Niña dan pemanfaatan lahan rawa lebak di Sumatra saat El Niño yang berpotensi meningkatkan produksi beras Nasional. Hal ini juga diungkap pada penelitian Iizumi et al. (2014) yang memetakan pengaruh ENSO terhadap produksi global tanaman pangan. Dalam penelitian tersebut menunjukkan bahwa kondisi El Niño dapat membawa pengaruh positif terhadap produksi padi di sebagian daerah di Pulau Sumatra. Apriana et al. (2019) juga telah menunjukkan bagaimana pengaruh ENSO dapat menunda waktu tanam padi 4–6 dasarian di wilayah Sumatra Barat dan Jawa Barat.

Manfaat positif dari El Niño dapat diperoleh juga pada lahan pasang surut atau lebak, di mana pada saat musim kemarau dapat dilakukan penanaman pada areal yang biasanya tergenang dengan

menggunakan sistem penataan lahan pasang surut (surjan). Sistem surjan ini memiliki perspektif ekonomi, ekologi, dan budaya yang memadukan inovasi teknologi terkini dengan kearifan lokal (Susilawati & Nursyamsi, 2014).

Peningkatan produksi saat terjadi kondisi ekstrem tentunya tidak hanya dapat mengandalkan pada adanya perubahan luas lahan sebagai akibat perubahan kondisi hidrologi, tetapi perlu juga disertai dengan upaya-upaya lain yang lebih adaptif, seperti dilakukannya langkah-langkah untuk mengantisipasi penanggulangan serangan OPT, penggunaan varietas yang lebih tahan terhadap serangan OPT, pengembangan infrastruktur untuk regulasi sistem pengairan, ataupun pengembangan konsep panen dan hemat air. Tentunya, semua upaya tersebut perlu ditunjang oleh kemampuan teknologi yang adaptif.

Untuk memperoleh produktivitas optimal dari sektor pertanian diperlukan kecermatan dalam menganalisis semua tantangan dan peluang di berbagai kondisi iklim dan cuaca. Pada Bab III telah ditunjukkan suatu strategi adaptasi untuk tanaman padi dan jagung di NTT, yaitu dengan memanfaatkan informasi indeks iklim global, ENSO, dan curah hujan di NTT. Strategi adaptasi dilakukan dengan analisis prediksi potensi air hujan dalam menentukan kalender tanam. Perlu dilakukan pemilihan varietas umur pendek untuk waktu panen yang lebih cepat sehingga lebih adaptif terhadap dampak perubahan iklim. Pemahaman fase pertumbuhan jagung juga sangat penting terutama saat penentuan fase jagung yang membutuhkan lebih banyak air sehingga waktu tanam jagung dapat ditentukan dengan mempertimbangkan informasi iklim global, prediksi curah hujan, dan potensi ketersediaan air.

B. Perkembangan dan Pemanfaatan Model Iklim

Langkah adaptasi terhadap dampak perubahan iklim dan kondisi ekstrem di sektor pertanian tidak akan lepas dari kebutuhan akan informasi mengenai cuaca dan iklim. Para pengambil kebijakan sangat bergantung pada prediksi iklim dan cuaca untuk dapat menentukan langkah-langkah strategis sehingga produktivitas dapat dipertahankan.

kan, bahkan ditingkatkan. Pada umumnya, sistem prediksi iklim dikembangkan dengan menggunakan model-model iklim. Bab IV dan V membahas tentang model cuaca/iklim yang merupakan simulasi komputasi terkait cuaca/iklim dapat dimanfaatkan untuk memahami dinamika atmosfer untuk cuaca, musim dan jangka panjang. Model iklim dapat digunakan untuk mempelajari kondisi atmosfer yang telah lampau, sekarang, dan yang akan datang mulai dari skala harian, musiman hingga tahunan. Seiring dengan perkembangan teknologi komputasi performa tinggi, model cuaca/iklim menjadi makin berkembang dan tidak hanya melibatkan atmosfer saja, tetapi juga memperhitungkan lautan, daratan, dan lapisan es. Model ini biasa disebut model iklim global (*global climate model*).

Institusi riset dunia banyak memanfaatkan model iklim global untuk memprediksi cuaca ekstrem, seperti siklon, tornado, seruak dingin, gelombang panas, dan sebagainya. Pada skala musiman dan tahunan, model ini digunakan untuk memprediksi awal dan akhir musim kemarau/hujan, dan prediksi ENSO untuk beberapa bulan hingga beberapa tahun ke depan. Untuk memandu model tersebut, para peneliti memanfaatkan hasil pengamatan cuaca dan iklim di darat, laut dan udara untuk diasimilasikan pada model iklim tersebut sebagai kondisi awal untuk melakukan prediksi selanjutnya. Institusi riset dunia juga mendirikan suatu kerangka kolaborasi yang bertujuan untuk menganalisis, memperbaiki, dan mengembangkan model iklim dan menambah pemahaman tentang perubahan iklim dengan membandingkan hasil simulasi dari model-model iklim yang berbeda. Kegiatan kolaborasi ini dikenal sebagai Coupled Model Intercomparison Project.

BMKG sebagai institusi resmi pemerintah yang bertugas melakukan pengamatan dan menginformasikan prediksi cuaca, musim, dan iklim memanfaatkan model dinamis baik model global dan regional dan model statistik, contohnya dalam menentukan awal musim (Tabel 6.2). Jaringan pengamatan *in situ* BMKG yang tersebar di pelosok wilayah juga menjadi alat untuk melakukan pengamatan perubahan musim dan iklim di Indonesia. Pada Bab VI telah dibahas dengan

detail bagaimana BMKG melakukan pembagian Zona Musim (ZOM) yang sampai saat ini berjumlah 699 wilayah. Pembagian ZOM ini tidak hanya melibatkan model iklim global, tetapi juga memanfaatkan seluruh stasiun pengamatan BMKG. Hal ini sangat berguna dalam penyusunan kalender tanam di mana faktor cuaca lokal suatu wilayah juga diperhitungkan. Dengan demikian, penentuan musim tidak hanya bergantung kepada model iklim global yang hanya dapat memberikan informasi kondisi atmosfer global akibat keterbatasan dari resolusi spasial yang kasar. Salah satu kontribusi BMKG dalam ketahanan pangan adalah pemanfaatan Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu (SI KATAM Terpadu) yang memanfaatkan prediksi hujan dari BMKG. Selain itu, data *in situ* ini juga berguna untuk memvalidasi hasil simulasi model-model iklim dan model statistik lainnya yang dilakukan institusi dunia khususnya di wilayah benua maritim Indonesia, di mana banyak model iklim memperlihatkan bias sistemik di wilayah ini.

C. Pemanfaatan Teknologi Digital dan Pengindraan Jauh

Sistem prediksi iklim tidak pernah lepas dari teknologi digital. Berbagai metode berbasis komputasi telah banyak berkembang untuk menunjang sistem prediksi iklim, di antaranya Fuzzy Time Series, Hierarchical Neural Model, Artificial Neural Network, Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA), dan sebagainya yang dengan kelemahan dan kelebihannya telah banyak digunakan untuk memalkan curah hujan di berbagai daerah. Seasonal ARIMA (SARIMA) sebagai pengembangan dari model ARIMA dengan menggabungkan efek musiman telah digunakan untuk pendekatan dalam menentukan musim tanam dan menentukan strategi yang tepat untuk menanam pada kondisi curah hujan yang relatif rendah. Dalam Bab VII telah dibahas bahwa pemanfaatan teknologi digital ini tidak hanya untuk pertanian pada tahap prediksi iklim, tetapi juga mulai dari akuisisi data berbasis satelit, serta aplikasi-aplikasi dalam analisis ketersediaan air, pemilihan lahan, penentuan waktu tanam, yang akan men-

jadi masukan dalam manajemen pertanian. SPKL dan CROPWAT merupakan salah satu contoh aplikasi yang sering digunakan dalam manajemen pertanian. Aplikasi tersebut sangat bergantung pada data model iklim yang digunakan. Dengan demikian, validitas output SPKL dan CROPWAT akan sangat tergantung pada validitas dan akurasi data iklim yang digunakan.

Tantangan model iklim adalah ketidakpastian dalam prediksi/simulasi. Ketidakpastian ini muncul karena keterbatasan pemahaman terhadap proses-proses fisika dan dinamika yang terjadi di atmosfer. Penyederhanaan fenomena fisika atmosfer menjadi suatu persamaan empirik dapat membawa bias yang terus merambat, baik secara spasial maupun temporal. Beberapa strategi yang dapat digunakan untuk mengurangi bias yang muncul dalam prediksi iklim adalah menggunakan teknik ensembel (menjalankan model dengan konfigurasi yang berbeda), menggunakan teknik statistik (seperti dalam Bab VIII), melakukan asimilasi data dengan berbagai sumber data, baik itu data *in situ* maupun data pengindraan jauh.

Perkembangan teknologi satelit sebagai salah satu teknik pengindraan jauh telah banyak memberikan manfaat untuk digunakan pengamatan parameter iklim. Selain itu, data satelit juga banyak dimanfaatkan untuk pengembangan sistem asimilasi data prediksi iklim untuk memperoleh hasil dengan akurasi dan resolusi yang lebih baik. Misalnya, pengamatan suhu permukaan laut yang sangat penting untuk memprediksi kuat lemahnya ENSO. Misi satelit pengamatan hujan pada Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) dan Global Precipitation Measurement Mission (GPM) yang memanfaatkan inovasi radar hujan, yaitu dipasang pada satelit sejak tahun 1997 telah berhasil memberikan sumbangsih dalam pengamatan hujan di dunia dan banyak dimanfaatkan para *stakeholder* dalam sektor kebencanaan, hidrologi, dan pertanian.

Satelit TRMM yang aktif dalam kurun waktu 1997–2015 dilengkapi perangkat radar hujan dan *microwave imager*. Radar hujan dapat melihat hujan dalam bentuk kolom yang dapat digunakan untuk mendapatkan informasi berupa struktur vertikal struktur badai

tropis, sedangkan *microwave imager* bekerja dengan menangkap sinyal radiasi gelombang mikro yang dipancarkan bumi dan atmosfer sehingga kita dapat melakukan estimasi terhadap air, awan, dan intensitas hujan yang terjadi di atmosfer. Misi pengukuran hujan selanjutnya dilanjutkan GPM sejak tahun 2014 yang dilengkapi radar hujan yang lebih sensitif terhadap mendeteksi hujan ringan dan salju serta dapat memberikan informasi lebih baik terkait awan dan aerosol. BMKG telah memanfaatkan salah satu produk GPM, yaitu Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) untuk dikombinasikan dengan data curah hujan tiap stasiun pengamatan sehingga diperoleh informasi spasial hujan dengan resolusi spasial hingga ~5.5 km.

Bab IX membahas tentang teknologi satelit GNSS yang dimanfaatkan untuk mengukur profil vertikal atmosfer. GNSS merupakan sistem navigasi satelit yang digunakan untuk menentukan posisi di bumi dan sekarang banyak digunakan dalam sistem komunikasi dan transportasi. Para peneliti memanfaatkan teknik radio okultasi untuk mengestimasi profil vertikal atmosfer, yaitu kelembapan dan temperatur. Informasi ini sangat berguna sebagai modal untuk melakukan asimilasi untuk setiap level grid ketinggian pada model cuaca dan iklim. Perlu diketahui bahwa informasi profil vertikal atmosfer sangatlah terbatas. Radiosonde dapat memberikan profil vertikal atmosfer, tetapi umumnya hanya diluncurkan di atas daratan dan tersedia di jam tertentu saja dengan biaya peluncuran relatif mahal. Hasil penelitian Ha et al. (2014) menunjukkan hasil menjanjikan dengan mengasimilasikan data profil vertikal refraktivitas GPS-RO ke dalam model cuaca untuk kasus prediksi hujan lebat. Wilhelmsen et al. (2018) juga telah mengembang indeks Quasi Biennial Oscillation dan ENSO index yang diturunkan dari pengamatan GPS-RO selama 15 tahun. Indeks ini memiliki kelebihan daripada indeks ENSO yang biasa digunakan karena indeks ini diturunkan dari nilai refraksi atmosfer sehingga meniadakan potensi keterlambatan/jeda respons suatu variabilitas atmosfer. Dapat dikatakan indeks ini mengukur variabilitas atmosfer di waktu yang sama. Hal ini berbeda dengan indeks ENSO yang diturunkan dari nilai suhu permukaan laut membuat

kita perlu memperhitungkan adanya potensi jeda waktu respons/keterlambatan. Selain itu, indeks ENSO dari GPS-RO ini juga telah memperhitungkan variabilitas atmosfer di setiap ketinggian, tidak hanya di satu level ketinggian saja seperti suhu permukaan laut.

Bab X memberikan sebuah solusi dalam bentuk aplikasi peringatan dini yang digagas institusi pemerintah di Indonesia, yaitu Badan Meteorologi dan Geofisika (BMKG), BRIN, BIG, Kementan, dan bekerja sama dengan para periset Ilmu Tanah, Agroklimatologi dan Hidrologi untuk menjaga produksi tanaman hortikultura dari ancaman banjir, kekeringan, dan serangan OPT. Aplikasi ini dinamakan Early Warning System (EWS) Perlindungan Hortikultura dan Pengelolaan Tanam Komoditas Strategis (SIPANTARA). Aplikasi ini dibangun dengan memanfaatkan data iklim, data banjir dan kekeringan, serta data OPT dominan. Aplikasi ini mengadopsi penggunaan geospatial *artificial intelligence* yang memprediksi banjir dan kekeringan hingga skala kecamatan berdasarkan hasil *training* pola curah hujan di Indonesia selama 10 tahun terakhir. Keunggulan EWS ini memberikan informasi prediksi iklim dan ancaman banjir dan kekeringan untuk 3–5 bulan ke depan, informasi jadwal tanam potensial dan informasi OPT yang dominan sebagai upaya adaptasi dan mitigasi.

D. Menuju Pertanian Berkelanjutan

Bertambahnya kebutuhan pangan seiring pertambahan penduduk menuntut kita untuk dapat menyediakan dan menjaga keberlangsungan produksi pangan. Perubahan iklim yang terjadi dapat membawa dampak negatif menjadi tantangan kita untuk mempertahankan produksi pangan. Salah satu upaya penting untuk beradaptasi dan melakukan mitigasi adalah dengan menerapkan konsep pertanian cerdas iklim, seperti yang telah dibahas pada Bab XI. Pertanian cerdas iklim merupakan suatu pendekatan integratif untuk mencapai ketahanan pangan dalam tantangan perubahan iklim. Beberapa upaya yang dapat dilakukan, yaitu dengan membangun infrastruktur pertanian dan sistem irigasi yang baik, diversifikasi tanaman, pengolahan tanah/lahan yang berkelanjutan dengan penerapan *conservation*

agriculture, membangun suatu sistem peringatan dini cuaca ekstrem untuk pertanian dari bencana hidrometeorologi dan serangan OPT, pendidikan dan peningkatan kesadaran petani dalam penerapan CSA, serta pengurangan resiko bencana dan penelitian dan inovasi. CSA juga bertujuan untuk menciptakan pertanian yang menghasilkan emisi gas rumah kaca yang rendah. Hal ini dapat diwujudkan dengan mengurangi pengolahan tanah, penerapan *precision farming*, penerapan wanatani, pengelolaan ternak, penggunaan energi terbarukan dan penggunaan lahan yang berkelanjutan seperti penerapan rotasi tanaman. Bab XII menjelaskan salah satu penerapan CSA yang dapat mengurangi emisi gas metan dari aktivitas pertanian, yaitu dengan menggiatkan pertanian aerobik yang membutuhkan air lebih sedikit dengan irigasi berselang. Penerapan pertanian aerobik ini dapat memelihara kondisi tanah aerobik yang kaya oksigen di seluruh siklus penanaman padi dan dapat mengurangi degradasi tanah. Hasil penerapan pertanian aerobik di Indonesia, Amerika Serikat, Australia, Tiongkok, dan Bangladesh telah mencatat berkurangnya emisi metana hingga 50 persen. Salah satu tantangan untuk menerapkan lingkungan aerobik yang optimal untuk tanaman ini adalah curah hujan di wilayah Indonesia yang berbeda. Hal ini menuntut manajemen irigasi yang tepat untuk menciptakan kondisi aerobik yang dapat diwujudkan dengan menerapkan CSA seperti pengamatan cuaca *real time* dan menerapkan irigasi presisi.

Buku ini telah mengungkapkan berbagai peran kemajuan sains dan teknologi di bidang atmosfer dalam upaya untuk menciptakan ketahanan pangan di tengah tantangan kondisi perubahan iklim. Pemahaman dan pemanfaatan indeks iklim global, kemajuan model iklim, peran satelit meteorologi telah dimanfaatkan pemerintah, swasta, dan lembaga riset untuk mengkaji dan memprediksi cuaca dan iklim. Peran BMKG sebagai lembaga meteorologi resmi di Indonesia menjadi sangat penting dalam melakukan pengamatan secara kontinu, mengumpulkan dan menyampaikan informasi cuaca dan iklim ke masyarakat dan pemangku kepentingan. Hasil riset dan inovasi di bidang sains atmosfer dan teknologi juga telah dimanfaatkan untuk

pengembangan sistem peringatan dini/pengambil keputusan yang dapat dimanfaatkan langsung oleh petani. Dalam pelaksanaannya dan menjaga keberlangsungan upaya mewujudkan ketahanan pangan selalu diperlukan kolaborasi berbagai pihak, konsistensi, dan pendampingan lapangan untuk para petani. Ketersediaan pangan akan menciptakan stabilitas ekonomi, kemandirian pangan, dan meningkatnya kesejahteraan sosial.

Referensi

- Apriyana, Y., Aldrian, E., & Koesmaryono, Y. (2019, November). The dynamics of rice cropping calendar and its relation with the ENSO (El Niño-Southern Oscillation) and IOD (Indian Ocean Dipole) in Monsoon and Equatorial Regions of Indonesia. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 363, No. 1, Artikel 012013). IOP Publishing.
- Boer, R., & Surmaini, E. (2020). Economic benefits of ENSO information in crop management decisions: case study of rice farming in West Java, Indonesia. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(4), 1435–1446. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03055-9>
- Cai, W., Santoso, A., Collins, M., Dewitte, B., Karamperidou, C., Kug, J.-S., Lengaigne, M., McPhaden, M. J., Stuecker, M. F., Taschetto, A. S., Timmermann, A., Wu, L., Yeh, S.-W., Wang, G., Ng, B., Jia, F., Yang, Y., Ying, J., Zheng, X.-T., Bayr, T. ... Zhong, W. (2021). Changing El Niño–Southern oscillation in a warming climate. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(9), 628–644.
- Cao, J., Zhang, Z., Tao, F., Chen, Y., Luo, X., & Xie, J. (2023). Forecasting global crop yields based on El Niño Southern Oscillation early signals. *Agricultural Systems*, 205, 103564.
- Change, I. C. (2013). The Physical Science Basis.
- Iizumi, T., Luo, J. J., Challinor, A. J., Sakurai, G., Yokozawa, M., Sakuma, H., Brown, M. E., & Yamagata, T. (2014). Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. *Nature communications*, 5(1), 3712.
- Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529, 84–87 <https://doi.org/10.1038/nature16467>.

- Malau, L. R. E., Ulya, N. A., Anjani, R., & Rahmat, M. (2021, October). Study of ENSO impact on agricultural food crops price as basic knowledge to improve community resilience in climate change. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 874, No. 1, Artikel 012008). IOP Publishing.
- FAO. (2021). *The impact of disasters and crises on agriculture and food security: 2021*. <https://doi.org/10.4060/cb3673en>
- Sekhar, C. S. C. (2018). Climate change and rice economy in Asia: Implications for trade policy. Dalam *The state of agricultural commodity markets (SOCO)* (Vol. 2018). FAO.
- Wilhelmsen, H., Ladstädter, F., Scherllin-Pirscher, B., & Steiner, A. K. (2018). Atmospheric QBO and ENSO indices with high vertical resolution from GNSS radio occultation temperature measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(3), 1333–1346.

Glosarium

- adaptasi perubahan iklim : upaya untuk mengantisipasi akibat yang ditimbulkan oleh perubahan iklim terhadap sektor pertanian
- agile scrum* : salah satu bagian dari proses dari metode *agile software development*
- agile software development* : proses pengembangan yang dilakukan bertahap bagian demi bagian (*incremental*), secara cepat, serta melibatkan berbagai pemangku kepentingan secara langsung
- analisis kebutuhan sistem : merupakan analisis yang dibutuhkan untuk menentukan spesifikasi kebutuhan sistem. Spesifikasi ini juga meliputi elemen atau komponen-komponen apa saja yang dibutuhkan untuk sistem yang akan dibangun sampai dengan sistem tersebut diimplementasikan.

- daerah pertemuan angin antartropis : suatu daerah di sekitar katulistiwa yang merupakan pertemuan antara angin dari belahan bumi utara dengan angin dari belahan bumi selatan, merupakan daerah yang suhunya tertinggi dibandingkan daerah sekitarnya, banyak mengalami penguapan yang banyak sehingga menyebabkan daerah ini memiliki kelembapan yang tinggi dan banyak terbentuk awan
- dampak perubahan iklim (DPI) : meningkatnya kejadian iklim ekstrim yang berpotensi menimbulkan banjir, tanah longsor, kekeringan, angin topan, serangan OPT, dan/atau wabah Penyakit Hewan Menular.
- desain aplikasi : suatu proses perancangan antarmuka yang efektif dan efisien ditujukan bagi pengguna aplikasi. Proses ini melibatkan perancangan tata letak, penggunaan warna, tipografi, ikon, animasi, dan interaksi pengguna untuk menciptakan pengalaman pengguna yang optimal.
- DMD *downscaling* : teknik menggunakan model iklim skala besar untuk membuat prediksi iklim pada skala temporal dan spasial yang lebih halus
- early warning system* (EWS) : berarti sistem peringatan dini, serangkaian sistem untuk memberitahukan akan timbulnya kejadian alam, dapat berupa bencana maupun tanda-tanda alam lainnya. Peringatan dini pada masyarakat atas bencana merupakan tindakan memberikan informasi dengan bahasa yang mudah dicerna oleh masyarakat. Dalam keadaan kritis, secara umum peringatan dini yang merupakan penyampaian informasi tersebut diwujudkan dalam bentuk sirine, kentongan, dan sebagainya.

- El Niño : Kejadian anomali iklim global yang ditandai dengan keadaan suhu permukaan laut (SPL) atau *sea surface temperature* (SST) di Samudra Pasifik tropis bagian tengah dan timur yang lebih panas dibandingkan suhu normalnya. Pada kondisi El Niño, kolam hangat ini dapat meluas hingga wilayah Pasifik tropis bagian tengah. Hal ini diikuti oleh melemahnya angin pasat (*trade wind*) di sepanjang Pasifik tropis sehingga terjadi pergeseran pusat konveksi (awan yang berpotensi hujan) ke wilayah Pasifik tropis bagian tengah. Kondisi El Niño umumnya memberikan dampak berkurangnya curah hujan di wilayah Indonesia.
- El Niño Southern Oscillation (ENSO) : merupakan fenomena laut-atmosfer yang terjadi secara berkala dan tidak teratur yang melibatkan suhu permukaan laut di Samudra Pasifik timur laut, dan berpengaruh terhadap sebagian besar daerah tropis dan subtropis
- geospatial artificial intelligence* (GeoAI) : teknologi yang menggabungkan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI) dengan teknologi geospasial
- hortikultura : cabang dari ilmu pertanian yang mempelajari budi daya buah-buahan, sayuran dan tanaman hias
- iklim ekstrem : kejadian yang jarang terjadi dengan nilai intensitas melewati ambang batas atas atau bawah dari suatu unsur iklim, secara statistik didefinisikan berada di bawah persentil 10 atau di atas persentil 90 dari sebaran probabilitas rata-rata kondisi klimatologi

- iklim mikro : kondisi iklim pada suatu ruang yang sangat terbatas, tetapi komponen iklim ini penting artinya bagi kehidupan tumbuhan, hewan, dan manusia. Iklim mikro pada tanaman adalah kondisi iklim/cuaca disekitar tanaman mulai dari perakaran terdalam hingga tajuk teratas tanaman.
- Indian Ocean Dipole (IOD) : gejala penyimpangan cuaca yang disebabkan oleh interaksi antara atmosfer dan samudra yang terjadi di kawasan Samudra Hindia sekitar garis khatulistiwa (tropis) dan di sebelah selatan Jawa
- internet of things* (IoT) : segala sesuatu yang mengacu pada jaringan kolektif perangkat yang saling terhubung disertai teknologi yang memfasilitasi komunikasi antara perangkat dan *cloud*, serta antarperangkat itu sendiri
- kampung hortikultura : suatu kampung yang kelompok taninya fokus pada budi daya tanaman hortikultura
- kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI) : simulasi yang meniru proses kecerdasan manusia, seperti komunikasi, pembelajaran, dan pengambilan keputusan oleh mesin atau sistem komputer.
- La Niña : kejadian anomali iklim global yang ditandai dengan keadaan suhu permukaan laut (SPL) atau *sea surface temperature* (SST) di Samudra Pasifik tropis bagian tengah dan timur yang lebih dingin dibandingkan suhu normalnya. Pada saat La Niña, angin pasat di sepanjang Pasifik tropis menguat dan terjadi peningkatan *upwelling* di sepanjang khatulistiwa dan pantai barat Amerika Selatan. Sirkulasi Walker bergeser ke barat sehingga terjadi peningkatan konveksi dan hujan di wilayah Pasifik barat, Indonesia, dan Australia

<i>machine learning</i>	:	suatu teknologi yang dikembangkan di mana mesin diarahkan untuk bisa belajar dengan sendirinya tanpa arahan dari penggunanya. Pembelajaran mesin dikembangkan berdasarkan disiplin ilmu lainnya, seperti statistika, matematika, dan <i>data mining</i> sehingga mesin dapat belajar dengan menganalisis data tanpa perlu diprogram ulang atau diperintah.
model empiris	:	perwujudan dari abstraksi hipotesis yang telah dijelaskan sebelumnya tentang hubungan antarvariabel yang disusun berdasarkan teori-teori yang terkait dengan variabel-variabel tersebut
model matematika	:	secara sederhana dapat diartikan sebagai kumpulan persamaan yang digunakan untuk mewakili sistem fisik. Model ini pada umumnya digunakan dalam membuat suatu persamaan dalam ilmu matematika.
<i>off season</i>	:	pertanaman di luar musimnya
organisme pengganggu tumbuhan (OPT)	:	semua organisme yang dapat merusak, mengganggu kehidupan, atau menyebabkan kematian tumbuhan
pengembangan aplikasi	:	proses pembuatan program komputer atau serangkaian program untuk menjalankan berbagai tugas yang diperlukan sebuah bisnis
pola curah hujan monsunal	:	pola curah hujan yang memiliki perbedaan yang jelas antara periode musim hujan dengan periode musim kemarau, dicirikan oleh satu puncak musim hujan, biasanya pada bulan Desember, Januari, dan Februari atau pada bulan-bulan basah, dan satu puncak musim kering, biasanya pada bulan Juni, Juli, dan Agustus

- remote sensing* (atau pengindraan jarak jauh) : suatu pengukuran atau akuisisi data suatu objek ataupun fenomena oleh sebuah alat yang tidak melakukan kontak secara fisik dengan objek tersebut atau dikatakan dari jarak jauh. Contoh dari sistem penginderaan jarak jauh ini yakni satelit pengamatan bumi, satelit cuaca, kapal, memonitor janin dengan bantuan ultrasonik dan wahana luar angkasa yang melakukan pemantauan planet dari orbit.
- sensor ultrasonik : sensor yang memanfaatkan pancaran gelombang ultrasonik yang berfungsi untuk mengubah besaran fisis (bunyi) menjadi besaran listrik dan sebaliknya
- sentra produksi : unit kecil dari sebuah kawasan yang di dalamnya terdapat proses produksi. Area tersebut biasanya cukup khusus untuk produksi suatu komoditas.
- sirkulasi angin monsun Asia-Australia : sirkulasi angin yang berhembus secara periodik (minimal tiga bulan) dari benua Asia ke benua Australia atau sebaliknya, yang polanya akan berlawanan dan berganti arah secara berlawanan setiap setengah tahun
- smart farming* : sistem pertanian pintar guna meningkatkan efisiensi serta produktivitas pertanian
- telekoneksi : rantai proses saat perubahan lautan atau atmosfer di satu wilayah menyebabkan perubahan sirkulasi dan suhu atmosfer ber-skala besar yang dapat memengaruhi cuaca di tempat lain
- usability testing* : pengujian terhadap perangkat lunak sedemikian rupa agar sebuah perangkat lunak harus dapat digunakan dengan mudah oleh penggunanya

- variabilitas iklim : perbedaan aspek iklim, seperti suhu dan curah hujan, dari rata-rata dalam periode waktu yang pendek, seperti bulan, musim, atau tahun. Variabilitas iklim terjadi karena perubahan sirkulasi udara dan lautan secara alami dan terkadang berkala, letusan gunung berapi, dan faktor lainnya.
- wilayah endemik : biasanya terkait penyakit, wilayah tertentu yang terus-menerus terkena serangan penyakit
- withbox testing* : teknik perancangan uji kasus pada perangkat lunak atau aplikasi menggunakan struktur kontrol dan perancangan prosedural untuk mendapatkan *test case*

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Daftar Singkatan

ANFIS	:	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
ARIMA	:	Auto Regressive Integrated Moving Average
BART	:	Bayesian Additive Regression Trees
BIG	:	Badan Informasi Geospasial
BMKG	:	Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika
BNPB	:	Badan Nasional Penanggulangan Bencana
BoM	:	Bureau of Meteorology
BPS	:	Badan Pusat Statistik
BSISO	:	Boreal Summer Intraseasonal Oscillation
CA	:	<i>Constructed analogue</i>
CCA	:	<i>Canonical correlation analysis</i>
CCSM	:	Community Climate System Model
CFSv2	:	Climate Forecast System version 2
CSA	:	Climate Services for Agriculture
DD	:	<i>Dynamical downscaling</i>

DMD	:	<i>Dynamic mode decomposition</i>
ECMWF	:	European Centre for Medium Range Weather Forecasts
ENSO	:	El Niño-Southern Oscillation
EOFs	:	Empirical Orthogonal Functions
FLOR	:	Forecast-Oriented Low Ocean Resolution
GCM	:	<i>General circulation model</i>
GDPPS	:	Global Data Processing and Forecasting System
GFDL	:	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
IOD	:	Indian Ocean Dipole
IRI	:	International Research Institute
LAPAN	:	Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
LOGIT	:	<i>Logistic model</i> (model logistik)
MH	:	Musim hujan
MJO	:	Madden-Julian Oscillation
MK	:	Musim kemarau
MLP	:	<i>Multi-layer perceptrons</i>
NASA	:	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	:	National Oceanic Atmospheric Administration
NWS	:	National Weather Service
OPT	:	Organisme pengganggu tanaman; organisme pengganggu tumbuhan
PCA	:	<i>Principal component analysis</i>
PCR	:	<i>Principal component regression</i>
RF	:	<i>Random forests</i>
RH	:	<i>Relative humidity</i> (Kelembapan Relatif)
SD	:	<i>Statistical downscaling</i>
SI KATAM	:	Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu Terpadu
SPB	:	<i>Spring predictability barrier</i>
SPL	:	Suhu permukaan laut
SVD	:	<i>Singular value decomposition</i>

TRMM	:	Tropical Rainfall Measuring Mission
TSLM	:	Time Series Linear Model (Model Deret Waktu Linier)
WBC	:	Wereng batang cokelat
WMO	:	World Meteorological Organization
ZOM	:	Zona Musim

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Tentang Penulis

Adi Ripaldi

Adi Ripaldi adalah PMG ahli madya dan Subkoordinator Bidang Peringatan Dini Iklim di Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. Penulis merupakan lulusan Diploma Meteorologi dari Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi Geofisika (STMKG) tahun 2004, Agronomi tahun 2008, dan Sains Atmosfer tahun 2013 dari Institut Teknologi Bandung. Penulis aktif di berbagai penelitian dan riset Climate Change Adaptation Project di Nusa Tenggara Barat bersama CSIRO dan Univeristas Mataram pada tahun 2010–2015, Project Seasonal Climate Forecasting for Better Irrigation System Management in Lombok, Indonesia bersama Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR) tahun 2006–2009. Saat ini, penulis sedang menempuh program doktoral Klimatologi Terapan di Institut Pertanian Bogor dan aktif sebagai tenaga ahli (*expert*) tim cuaca dan iklim pada pembangunan aplikasi EWS SIPANTARA, yaitu aplikasi peringatan dini dan mitigasi risiko dampak anomali iklim hortikultura yang merupakan proyek kerja sama antara Kementerian Pertanian, BRIN, BMKG, BIG, dan Sekolah Vokasi UNS.

Adyaksa Budi Raharja

Adyaksa Budi Raharja menempuh pendidikan D-3 Meteorologi di Akademi Meterologi dan Geofisika; D-4 Klimatologi di Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, S-2 Klimatologi Terapan di Institut Pertanian Bogor. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG, di antaranya sebagai *observer* di Stasiun Klimatologi Sumatra Selatan (2010–2016) serta analis dan *forecaster* iklim di Pusat Informasi Perubahan Iklim, BMKG (2016–sekarang).

Ai Dariah

Ai Dariah dilahirkan di Bandung, 10 Februari 1962. Menempuh S-1 Program Studi Ilmu Tanah di Institut Pertaian Bogor (1980–1984). Menempuh S-2 Bidang Ilmu Tanah (2009) dan S-3 (2010–2014).

Aidil Azhar

Aidil Azhar adalah seorang fungsional Pengawas Mutu Hasil Pertanian ahli muda di Direktorat Jenderal Hortikultura. Penulis menamatkan S-1 pada jurusan Sosial Ekonomi Pertanian di Fakultas Pertanian Universitas Syiah Kuala Banda Aceh pada tahun 2009. Setelah menamatkan pendidikan sarjana, penulis bekerja di *non-govermental organization* (NGO) yang menangani bencana tsunami di Aceh dan kemudian lulus di Kementerian Pertanian pada tahun 2011.

Alexander Eggy Christian Pandiangan

Alexander Eggy Christian Pandiangan menempuh pendidikan D-4 Klimatologi di Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika dan S-2 Sains Kebumian di Institut Teknologi Bandung. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG sebagai *observer* di BBMKG Wilayah IV Makassar (2014–2018), analis dan *forecaster* di Bidang Analisis dan Informasi Iklim di Pusat Informasi Perubahan Iklim, BMKG (2018–sekarang).

Alif Akbar Syafrianno

Alif Akbar Syafrianno menempuh pendidikan D-4 Klimatologi di Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, S-2 Klimatologi Terapan di Institut Pertanian Bogor. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG

sebagai analis dan *forecaster* iklim di Subbidang Peringatan Dini Iklim (2013–sekarang).

Amsari Mudzakir Setiawan

Amsari Mudzakir Setiawan adalah pakar di Bidang Analisis dan Informasi Iklim, dengan latar belakang pendidikan D-3 Meteorologi, Akademi Meteorologi dan Geofisika; S-1 Fisika, Universitas Negeri Makassar; S-2 Sains Kebumian, Institut Teknologi Bandung; dan S-3 Klimatologi Terapan, Institut Pertanian Bogor. Pengalaman bekerja di BMKG mencakup sebagai *observer* dan *forecaster* di Stasiun Meteorologi Maritim Bitung Sulawesi Utara (2004–2008), *forecaster* di BBMKG Wilayah IV Makassar (2008–2011), analis dan *forecaster* di Pusat Iklim Agroklimat dan Iklim Maritim (2011–2014), Kepala Subbidang Peringatan Dini Iklim (2014–2015), analis dan *forecaster* di Pusat Informasi Perubahan Iklim (2015–2021), serta Subkoordinator Bidang Analisis dan Informasi Iklim di Pusat Informasi Perubahan Iklim (2021–sekarang).

Andi Abdurahim

Andi Abdurahim merupakan staf Direktorat Perlindungan Hortikultura, Direktorat Jenderal Hortikultura, Kementerian Pertanian sejak tahun 2009. Saat ini, penulis merupakan pejabat fungsional Pengendali Organisme Pengganggu Tumbuhan (POPT) Ahli Muda di Direktorat Jenderal Hortikultura. Penulis menamatkan pendidikan S-1 pada Departemen Biologi FMIPA UI, kemudian melanjutkan S-2 pada Fakultas Ilmu Administrasi (Program Studi Administrasi Publik) Universitas Brawijaya.

Aneng Hermami

Aneng Hermami adalah seorang pejabat fungsional Pengendali Organisme Pengganggu Tumbuhan (POPT) Ahli Muda di Direktorat Perlindungan Hortikultura. Penulis menyelesaikan S-1 pada tahun 1993 dari jurusan Ekonomi Pertanian Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto. Pada tahun 2007, menyelesaikan S-2 Program Studi Ilmu Ekonomi Pertanian Institut Pertanian Bogor melalui program beasiswa Badan SDM Kementerian Pertanian. Setelah menyelesaikan studi S-1, penulis bekerja di Program Nasional Pengendalian Hama Terpadu pada periode 1995–1999. Sejak tahun

2000 hingga sekarang, penulis bertugas di Direktorat Jenderal Hortikultura. Penulis pernah menjabat sebagai Kepala Seksi Mutu di Direktorat Pengolahan dan Pemasaran Hasil Hortikultura dan saat ini menjabat sebagai Ketua Tim Kerja Mitigasi Perubahan Iklim Kelompok Penanganan Dampak Perubahan Iklim Direktorat Perlindungan Hortikultura.

Antoni Setiawan

Antoni Setiawan merupakan pejabat fungsional ahli muda Pengendali Organisme Pengganggu Tumbuhan (POPT) di Direktorat Perlindungan Hortikultura Kementerian Pertanian sejak tahun 2022. Penulis menyelesaikan S-1 Jurusan Ilmu Hama dan Penyakit Tumbuhan Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran tahun 2003. Saat ini, penulis sedang menyelesaikan studi S-2 di Departemen Proteksi Tanaman Fakultas Pertanian Institut Pertanian Bogor.

Arda Yuswantoro

Arda Yuswantoro adalah pakar klimatologi dengan latar belakang pendidikan D-3 Manajemen Informasi, S-1 Sistem Informasi STMIK Surakarta. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG sejak 2006–saat ini di Subbidang Analisa dan Informasi Iklim, BMKG.

Ardhasena Sopaheluwakan

Ardhasena Sopaheluwakan merupakan pakar klimatologi di BMKG dengan latar belakang pendidikan S-1 Matematika ITB; S-2 Engineering Mathematics, University of Twente; S-3 Institute for Nanotechnology, University of Twente; Postdoctoral Associate, University of Twente; Harvard Business School, Specialization in Strategy. Ardhasena telah memiliki pengalaman kerja yang luas di BMKG. Pada tahun 2012–2015, penulis menjabat sebagai Kasubbid Analisis dan Informasi Iklim, BMKG. Tahun 2015–2020 penulis menjabat sebagai Kabid Litbang Klimatologi dan Kualitas Udara, BMKG serta pada tahun 2020–2023 sebagai Kepala Pusat Layanan Informasi Iklim Terapan, BMKG. Tahun 2023–saat ini sebagai Deputi Bidang Klimatologi, BMKG merangkap Plt. Deputi Bidang Inskalrekjarkomi, BMKG.

Aris Pramudia

Aris Pramudia menyelesaikan pendidikan S-1, S-2, dan S-3 di Institut Pertanian Bogor pada bidang keahlian agrometeorologi dan agroklimatologi. Penulis merupakan peneliti ahli madya bidang tanah, agroklimat, dan hidrologi. Penulis pernah bertugas di Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian (1989–2022), dan saat ini bertugas di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer (PRIMA), Organisasi Riset Kebumian dan Maritim (ORKM), BRIN. Penulis telah menghasilkan lebih dari 100 karya tulis ilmiah yang diterbitkan di jurnal ilmiah nasional maupun internasional, prosiding global maupun nasional, buku maupun bagian buku, majalah semi popular, atlas dan lain-lain, serta 17 inovasi kekayaan intelektual berupa paten, hki, atau program komputer. Pada 2011, Penulis mendapat penghargaan sebagai “Peneliti Muda Berprestasi” dari Menteri Pertanian Republik Indonesia. Pada 2012 menjadi *co-chair* dalam International Workshop on Adaptation/Mitigation Technologies for Climate Change in Agriculture in the ASEAN Region and India di New Delhi, India. Salah satu inovasi penulis, yaitu Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu-Standing Crop (SI KATAM TERPADU-SC) mendapatkan predikat “TOP45 Inovasi Terpuji” dalam Kompetisi Inovasi Pelayanan Publik (KIPP) 2022 yang diselenggarakan secara nasional oleh Kementerian Penertiban Aparatur Negara dan Reformasi Birokrasi.

Asmarhansyah

Asmarhansyah lahir di Tanggamus, 24 Februari 1971. Mendapatkan gelar Sarjana Pertanian di Jurusan Ilmu Tanah Universitas Lampung pada 1995. Pendidikan S-2 dan S-3 pada *Major Soil Science* ditempuh di University of the Philippines Los Banos (UPLB), masing-masing lulus pada tahun 2004 dan 2016. Pada awal karir sempat bekerja sebagai *supervisor* pada PT Nusantara Tropical Farm, Lampung. Pada 1998, diterima sebagai CPNS di Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bertugas di berbagai satuan kerja, yaitu Balai Pengkajian Teknologi Pertanian (BPTP) Kalimantan Tengah (1998–2010), BPTP Kepulauan Bangka Belitung (2010–2017), BPTP Kepulauan Riau (2017–2018), Balai Penelitian Tanah (2018–2020), dan Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian (2020–2023). Pada 2023–2024, penulis menjabat sebagai Kepala BPSI Agroklimat dan Hidrologi Pertanian

dan sejak 2024 menjabat sebagai Kepala Balai Besar PSI Pascapanen Pertanian.

Bayu Dwi Apri Nugroho

Bayu Dwi Apri Nugroho, S.T.P., M.Agr., Ph.D. dilahirkan di Yogyakarta pada 12 April 1979. Setelah lulus SMA pada 1997, penulis melanjutkan studi S-1 di Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada. Kemudian, setelah lulus tahun 2002, beliau menjadi asisten peneliti di Fakultas Teknologi Pertanian dan pada 2007 mendapat kesempatan studi S-2 di Iwate University, Jepang, dengan beasiswa dari Hashiya Foundation dalam bidang *environmental sciences*, dan dilanjutkan program S-3 dengan kekhususan *agro-meteorology* dan *climate change*.

Damiana Fitria K.

Damiana Fitria K. menempuh pendidikan S-1 Matematika di Institut Teknologi Bandung. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG sebagai analis dan *forecaster iklim* di Subbidang Analisis Informasi Iklim (2018–sekarang).

Darmawan Lahru Riatma

Darmawan Lahru Riatma merupakan dosen aktif di D-3 program studi Teknik Informatika, Sekolah Vokasi Universitas Sebelas Maret. Penulis menyelesaikan pendidikan formal sarjana Teknik Informatika di PTIIK Universitas Brawijaya pada tahun 2013, dan S-2 Teknologi Informasi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2018. Bidang kepakaran dan fokus riset penulis adalah *software AI engineer*, *IT project manager*, dan *data science*. Penulis juga merupakan *founder* PT. Garapan Indonesia Sukses merupakan *holding* perusahaan yang menaungi *startup* Garapan.id, yaitu penyedia layanan *software as a service management project* dan *task management*. Hingga saat ini, penulis telah banyak mengembangkan banyak perangkat lunak dengan menggunakan algoritma AI untuk menyelesaikan problem yang dihadapi pemerintah maupun perusahaan nasional serta multinasional. Penulis sangat terbuka dan senang untuk berkolaborasi riset dan pengembangan perangkat lunak AI dengan berbagai bidang keilmuan untuk menyelesaikan permasalahan mitra.

Desy Rakhma Caesarani Utomo

Desy Rakhma Caesarani Utomo merupakan fungsional umum Analis Data dan Informasi di Direktorat Perlindungan Hortikultura, Kementerian Pertanian sejak tahun 2020. Penulis menyelesaikan pendidikan S-1 Prodi Agroekoteknologi Minar Manajemen Sumberdaya Lahan di Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya pada tahun 2018. Penulis merupakan bagian dari tim teknis Sistem Informasi Manajemen Dampak Perubahan Iklim (SIM DPI), The HopersDev (Horticulture Protection Early Warning Sistem Development), dan EWS SIPANTARA (Aplikasi Peringatan Dini dan Mitigasi Risiko Dampak Anomali Iklim Hortikultura).

Diah Ariefiandy

Diah Ariefiandy menempuh pendidikan S-1 Sistem Informasi Komputer di Universitas Gunadarma. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG sebagai analis dan *forecaster* iklim di Subbidang Peringatan Dini Iklim, BMKG (2006–sekarang).

Dian Nur Ratri

Dian Nur Ratri adalah seorang pakar klimatologi dengan latar belakang pendidikan S-1 di Institut Pertanian Bogor, S-2 di University of Melbourne, dan S-3 (*cand.*) Wageningen University and Research. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG sejak 2006 hingga saat ini di Subbidang Analisa dan Informasi Iklim, BMKG.

Dyah Ayu Kartika

Dyah Ayu Kartika adalah seorang analis dan *forecaster* iklim di BMKG dengan latar belakang pendidikan S-1 di Bidang Matematika, Universitas Hasanuddin. Penulis memulai kariernya di bidang klimatologi tahun 2019 hingga sekarang dan menjadi salah satu anggota dalam tim Operasional Analisis dan Prediksi Musim di Indonesia di BMKG.

Ella Winda Rahmatika

Ella Winda Rahmatika adalah seorang pejabat fungsional statistisi ahli pertama di Direktorat Jenderal Hortikultura. Penulis menamatkan pendidikan

S-1 jurusan Statistika di FMIPA Universitas Brawijaya tahun 2015. Setelah menamatkan S-1, penulis bekerja di Pusat Penganekaragaman Konsumsi dan Keamanan Pangan, Badan Ketahanan Pangan pada tahun 2018 dan kemudian pindah ke Direktorat Sayuran dan Tanaman Obat, Direktorat Jenderal Hortikultura pada tahun 2022.

Elsa Rakhmi Dewi

Elsa Rakhmi Dewi dilahirkan di Kota Bandung, 8 November 1975. Menempuh pendidikan Sarjana pada program studi Agronomi di Universitas Padjadjaran, Bandung (1994–2000) dengan kajian skripsi berjudul *Pengaruh Penerapan Effective Microorganism 4 (EM-4) dan Mulsia Jerami Padi terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Kentang (Solanum tuberosum L.) Kultivar Granola di Lahan Medium*. Penulis melanjutkan pendidikan *Master of Science* dengan studi utama terkait nutrisi tanaman di Leibniz University of Hannover, Jerman (2003–2005) dengan kajian berjudul *Perbedaan Genetik dalam Efisiensi Nitrogen pada Tanaman Kubis (Brassica oleracea)*. Pendidikan doktoral dilanjutkan di Georg August University of Gottingen, Jerman (2012–2016) dengan fokus studi “Tanaman dan Sistem Produksi di Daerah Tropis dengan kajian Mengintensifkan Sistem Lahan Bera di Asia Tenggara dengan Tanaman Palawija dan/atau Tanaman Musim Kemarau: Analisis Menggunakan Eksperimen dan Simulasi Lapangan”.

Elza Surmaini

Elza Surmaini adalah peneliti ahli utama di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Organisasi Riset Kebumian dan Maritim, BRIN sejak bulan Agustus 2022. Sebelumnya, ia bertugas sebagai peneliti di Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian. Ia menyelesaikan S-3 di Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, ITB pada tahun 2015. Selama 28 tahun, ia mengabdi pada bidang penelitian dengan fokus riset terkait pengelolaan risiko iklim, terutama pada sektor pertanian, *climate model impact*, dan adaptasi perubahan iklim. *E-mail:* elza001@brin.go.id.

Erni Susanti

Erni Susanti menyelesaikan pendidikan S-1 dan S-2 di Institut Pertanian Bogor dengan bidang keahlian agrometeorologi dan sistem informasi. Penulis

merupakan peneliti bidang tanah, agroklimat, dan hidrologi. Penulis pernah bertugas di Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian-Kementerian Pertanian (1989–2022), dan saat ini bertugas di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer (PRIMA), Organisasi Riset Kebumian dan Maritim (ORKM) BRIN. Penulis telah menghasilkan lebih dari 40 karya tulis ilmiah yang diterbitkan di berbagai jurnal ilmiah nasional maupun internasional, prosiding global maupun nasional, buku atau bagian buku, atlas dan lain-lain, serta beberapa inovasi kekayaan intelektual. Salah satu karya yang dihasilkan penulis adalah *Sistem Peringatan Dini Serangan Wereng Batang Coklat* dan *Atlas Sumber Daya Agroklimat Skala 1:500.000*.

Fachri Radjab

Fachri Radjab adalah pakar meteorologi dengan latar belakang pendidikan D-3 Meteorologi di AMG, S-1 Geografi di Universitas Indonesia, S-2 Ilmu Kelautan di Universitas Indonesia, dan S-3 Administrasi Publik di Universitas Negeri Makassar. Fachri memiliki pengalaman kerja sebagai Staf Prakirawan Stasiun Meteorologi El Tari Kupang, BMKG (1997–2003), Staf Prakirawan Sub Bidang Meteorologi Maritim, BMKG (2003–2009), Kepala Sub Bidang Siklon Tropis, BMKG (2009–2014), Kepala Bidang Informasi Meteorologi Publik, BMKG (2014–2016), Kepala Balai Besar MKG Wilayah IV Makassar, BMKG (2016–2018), Kepala Pusat Meteorologi Publik, BMKG (2018–2023), dan Kepala Pusat Informasi Perubahan Iklim, BMKG (2023–sekarang).

Fatchiyah

Fatchiyah menempuh pendidikan D-1 Meteorologi di Akademi Meterologi dan Geofisika, S-1 Teknik Informatika di Universitas Attahiriyyah. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG sebagai analisis dan Informasi Iklim (1993–2015), Subbagian Tata Usaha Deputi Klimatologi (2015–2021), analis dan *forecaster* iklim di Pusat Informasi Perubahan Iklim, BMKG (2021–sekarang).

Fathiya Nurrahmanita

Fathiya Nurrahmanita menempuh pendidikan D-4 Klimatologi di Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. Penulis memiliki pengalaman

an bekerja di BMKG sebagai analis dan *forecaster* iklim di Subbidang Analisis Informasi Iklim (2022–sekarang).

Ferrari Pinem

Ferrari Pinem merupakan pejabat fungsional Survey dan Pemetaan Madya di Badan Informasi Geospasial yang mengabdi sejak tahun 2002. Penulis menyelesaikan pendidikan S-1 bidang Geografi di Universitas Gadjah Mada pada tahun 2002 dan melanjutkan pendidikan S-2 ke Institut Pertanian Bogor Jurusan Informasi Teknologi pada tahun 2004. Setelah menyelesaikan pendidikannya, penulis aktif terlibat dalam kegiatan penyusunan Atlas Nasional hingga tahun 2016. Pada tahun yang sama, penulis diangkat menjadi Kepala Bidang Pemetaan Kebencanaan dan Perubahan Iklim hingga tahun 2020 dan selanjutnya diangkat kembali menjadi Koordinator Informasi Geospasial Tematik Bidang Kebencanaan hingga saat ini. Penulis mendapatkan pengetahuan tambahan khususnya di bidang pemetaan dari berbagai pelatihan teknis, lokakarya, dan *workshop* sejak tahun 2002. Beberapa kegiatan ilmiah internasional yang membahas isu-isu terkait atlas, kebencanaan, dan perubahan iklim pernah diikuti seperti keteliban dalam delegasi *Conference of the Parties* (COP) UNFCCC dan *International Cartographic Association* (ICA).

Hasalika Nurjannah

Hasalika Nurjannah menempuh pendidikan D-4 Klimatologi di Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG sebagai analis dan *forecaster* iklim di Subbidang Peringatan Dini Iklim, BMKG (2020–sekarang).

Hendry Puguh Susetyo

Hendry Puguh Susetyo bertugas di Direktorat Perlindungan Hortikultura, Kementerian Pertanian Republik Indonesia sejak tahun 2009, menjabat Fungsional Pengendali Organisme Pengganggu Tumbuhan (POPT) ahli madya sejak Juni 2023 pada Tim Kerja Data dan Informasi OPT. Penulis menamatkan S-1 jurusan Hama dan Penyakit Tumbuhan, Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran tahun 2008 dengan judul, *Pengaruh Ekstrak*

Biji Bitung (Barringtonia asiatica L Kurz (Lecythidaceae)) terhadap Efisiensi Pemanfaatan Makanan Larva Crocidolomia pavonana F (Lepidoptera: Pyralidae). Penulis menyelesaikan S-2 jurusan administrasi publik tahun 2014 dengan judul tesis, *Analisis Deskriptif Perencanaan Kegiatan Pengembangan Sistem Perlindungan Hortikultura (Studi Kasus: Direktorat Perlindungan Hortikultura).*

Indra Gustari

Indra Gustari menempuh pendidikan D-3 Meteorologi di Akademi Meterologi dan Geofisika; S-1 Teknik Informatika di STT-Harapan; S-2 Sains Kebumian di Institut Teknologi Bandung; dan S-3 Sains Kebumian di Institut Teknologi Bandung. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG, di antaranya Stasiun Meteorologi Blang Bintang Banda Aceh (1997–2000), BBMKG Wilayah I Medan (2000–2004), Puslitbang BMKG (2005–2006), BBMKG Wilayah I Medan (2006–2014), Dosen STMKG (2014–2016), Pusat Layanan Informasi Iklim Terapan, Deputi Bidang Klimatologi BMKG (2016–2017), Pusat Informasi Perubahan Iklim, Deputi Bidang Klimatologi BMKG (2017–2021), Stasiun Klimatologi Jawa Barat (2021–2023), Pusat Informasi Perubahan Iklim, Deputi Bidang Klimatologi, BMKG (2023–sekarang).

Januardi

Januardi atau yang akrab dipanggil Ardi memperoleh gelar *Doctor of Philosophy* (Ph.D) dari Department of Industrial Management, National Taiwan University of Science and Technology (NTUST), Taiwan. Fokus riset dari Ardi mencakup *supervised learning* untuk prediksi dengan *program R* dan permodelan optimasi di sistem kompetisi industri pertanian (agroindustri) dengan *game theory*. Saat ini, beliau adalah dosen tetap di Program Studi Sarjana Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran. *E-mail:* januardi@unpad.ac.id.

Kharmila Sari Hariyanti

Kharmila Sari Hariyanti adalah analis standardisasi di Badan Standardisasi Instrumen Pertanian, Kementerian Pertanian sejak tahun 2022. Penulis menamatkan pendidikan S-1 jurusan Geofisika dan Meteorologi di Institut

Teknologi Bandung tahun 1997. Adapun pendidikan S-2 dan S-3 penulis tempuh di Institut Pertanian Bogor jurusan Klimatologi Terapan pada tahun 2010 dan 2019. Setelah menamatkan S-1, penulis bekerja di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi di Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian pada tahun 2002–2022 sebagai peneliti. Penulis mendapat pengetahuan tambahan melalui berbagai pelatihan teknis dan lokakarya di bidang standarisasi, agroklimatologi, dan perubahan iklim.

Marlin Denata

Marlin Denata menempuh pendidikan D-4 Klimatologi di Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG sebagai analis dan *forecaster* iklim di Subbidang Analisis Informasi Iklim (2017–sekarang).

Mia Rosmiati

Mia Rosmiati menempuh pendidikan S-1 Meteorologi, Institut Pertanian Bogor. Penulis merupakan seorang analis dan *forecaster* di Subbidang Peringatan Dini Iklim, BMKG sejak tahun 2015 hingga sekarang.

Muhamad Roy Setiawan Tambunan

Muhamad Roy Setiawan Tambunan merupakan pejabat fungsional umum Analis Data dan Informasi di Direktorat Perlindungan Hortikultura, Kementerian Pertanian sejak tahun 2019. Penulis menyelesaikan S-1 pada program studi Agroekoteknologi Jurusan Budidaya Pertanian di Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya pada tahun 2018. Penulis merupakan bagian dari tim teknis Sistem Informasi Manajemen Dampak Perubahan Iklim (SIM DPI), The Hopers_Dev (Horticulture Protection Early Warning Sistem Development) dan EWS SIPANTARA (Aplikasi Peringatan Dini dan Mitigasi Risiko Dampak Anomali Iklim Hortikultura).

Muhammad Agfi Isra Ramadhan

Muhammad Agfi Isra Ramadhan menempuh pendidikan D-4 Meteorologi di Akademi Meterologi dan Geofisika. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG sebagai analis dan *forecaster* iklim di Subbidang Analisis Informasi Iklim, BMKG (2021–sekarang).

Muhammad Agung Sunusi

Muhammad Agung Sunusi menyelesaikan S-1 di Universitas Haluoleo Kendari, S-2 di Universitas Hasanuddin Makassar, dan S-3 di Universitas Negeri Jakarta dengan bidang keahlian Manajemen Lingkungan. Penulis bertugas di Direktorat Jenderal Hortikultura Kementerian Pertanian sejak 2002. Penulis adalah Pengamat OPT Madya dan saat ini berperan sebagai Ketua Kelompok Penanganan Dampak Perubahan Iklim, Direktorat Perlindungan Hortikultura.

Niken Wahyuni

Niken Wahyuni adalah pakar dalam bidang analisis dan informasi iklim dengan latar belakang pendidikan S-1 Statistika dari Universitas Padjadjaran. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG sebagai analis dan *forecaster* iklim di Subbidang Analisa dan Informasi Iklim, BMKG (2008–sekarang).

Novi Fitrianti

Novi Fitrianti menempuh pendidikan D-4 di Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika dan S-2 di University of Lyon. Penulis adalah seorang *observer* di Stasiun Klimatologi Pondok Betung serta analis dan *forecaster* iklim di Subbidang Peringatan Dini Iklim, BMKG.

Pada tahun 1997–2016, penulis bertugas di Badan Agribisnis dan Direktorat Jenderal Pengolahan dan Pemasaran Hasil Pertanian (PPHP). Pada tahun 2016–2018, penulis bertugas sebagai Kepala Seksi Investasi di Direktorat Pengolahan dan Pemasaran, Ditjen Hortikultura, dan sejak 2019, penulis bertugas di Direktorat Perlindungan Hortikultura. Saat ini, penulis merupakan Ketua Tim Kerja Data OPT (Organisme Pengganggu Tumbuhan) Hortikultura.

Penulis aktif menulis terkait isu lingkungan dan *global warming*, di antaranya artikel “Adaptasi dan Mitigasi Dampak Perubahan Iklim Sub Sektor Hortikultura” dan “*Model of Ecotourism Management in Ex Mine Area*” yang diterbitkan di International Journal of Environmental Research and Development, Research India Publication (RIP), serta buku berjudul *Pengukuran Gas Rumah Kaca (GRK) pada Lahan Budidaya Komoditas Cabai dan Bawang Merah dan Pengukuran Stok Karbon Buah Tahunan yang*

diterbitkan penerbit Pertanian Press. Penulis juga turut serta dalam proyek kolaborasi antara Kementan, BRIN, BMKG, dan BIG untuk mengembangkan aplikasi Early Warning Sistem (EWS) Pengelolaan Tanam Komoditas Hortikultura (SIPANTARA). Seminar yang pernah diikuti penulis, di antaranya *Regional Conference on Organic Agriculture* (Bangkok, Thailand), *Seminar on Edible Fungi Application and Dissemination for Officials from Developing Countries* (Beijing Shanghai), Pertemuan *the 8th ACCORD Task Force III Meeting on Law Enforcement*, dan *the 7th ACCORD Task Force IV Meeting on Alternative Development, Working Group on Agriculture, Food and Forestry* (WGAFFC), Darwin Australia.

Penulis aktif sebagai mitra bestari pada dua jurnal ilmiah nasional dan lima jurnal ilmiah internasional. Penulis tergabung dalam organisasi profesi, yaitu: (1) Perhimpunan Meteorologi Pertanian Indonesia (PERHIMPI), (2) Himpunan Ilmu Tanah Indonesia (HITI), (3) Perhimpunan Periset Indonesia (PPI), dan (4) Masyarakat Biodiversitas Indonesia (MBI). email: yaya028@brin.go.id; yanapri66@gmail.com; atau yanapri@yahoo.com

Penulis aktif sebagai pengurus pusat Perhimpunan Meteorologi Pertanian Indonesia (PERHIMPI) sebagai sekretaris 2 dan sebagai anggota Perhimpunan Periset Indonesia (PPI). *E-mail:* woro004@brin.go.id dan woroestiningtyas08@gmail.com.

Penulis aktif terlibat sebagai anggota tim dalam penyusunan Norma, Standar, Pedoman dan Kriteria di Direktorat Perlindungan Hortikultura. Termasuk di antaranya sebagai anggota tim pada pengembangan aplikasi EWS SIPANTARA. Beberapa pedoman yang telah disusun oleh penulis, di antaranya *Pedoman Pengenalan dan Pengendalian OPT pada Komoditas Hias Daun; Metode Pengamatan OPT Hortikultura dan Metode Pengamatan Kutu Putih dan Semut pada Komoditas Hortikultura*. Penulis juga berkesempatan menjadi pemateri pada beberapa pelatihan dan bimbingan teknis terkait metode pengamatan OPT hortikultura maupun pengenalan dan pengendalian OPT hortikultura untuk petugas perlindungan hortikultura di daerah baik daring maupun luring.

Penulis berkesempatan mengikuti magang/pelatihan, bimbingan teknis, seminar, *workshop* dan lokakarya bidang Hortikultura, Perencanaan Program/Kebijakan Perlindungan Hortikultura dan Kegiatan Perlindungan

Hortikultura secara teknis baik di dalam maupun luar negeri secara daring dan luring. Pelatihan luar negeri yang pernah diikuti penulis, di antaranya *Field Inspection of Potato Diseases (Potato Cyst Nematode)* yang dilaksanakan di *De Nederlandse Algemene Keuringsdienst* (NAK), Emmeloord, The Netherlands/Belanda pada tanggal 27 Juni–1 Juli 2016.

Penulis berkesempatan meningkatkan kapabilitasnya melalui berbagai pelatihan teknis dan seminar/lokakarya perlindungan tanaman dan dampak perubahan iklim yang diselenggarakan oleh Kementerian Pertanian dan instansi lainnya, baik dalam jaringan (*online*) maupun luring (*offline*). Pelatihan/*short course* internasional di luar negeri yang pernah diikuti, di antaranya *Horticultural Crop Production* di Korea Selatan dan *Course on Dryland Farming Techniques* di Tiongkok.

Penulis memulai kariernya sebagai Pegawai Negeri Sipil (PNS) di Dinas Pertanian Tanaman Pangan Kabupaten Bima, Nusa Tenggara Barat pada tahun 1994. Penulis mutasi ke Departemen Pertanian pada tahun 2006, tepatnya di BBP2TP, Badan Litbang Pertanian. Pada tahun 2020 menjabat menjadi Kepala Bidang Program dan Evaluasi BBP2TP. Pada tahun 2022, penulis diangkat sebagai Kepala Balai Penelitian Agroklimat dan menjadi salah satu penggagas Sistem Informasi KATAM Lahan Kering Versi 1.1 yang sudah mendapatkan hak kekayaan intelektual, serta mengantarkan SIKATAM-SC menjadi Top 45 dalam kompetisi inovasi pelayanan publik yang diselenggarakan oleh KemenpanRB pada tahun 2022. Pada tahun 2023, penulis menjadi Kepala Balai Besar Pengujian Standar Instrumen Sumber Daya Lahan Pertanian hingga saat ini.

Penulis mendapat pengetahuan tambahan melalui berbagai pelatihan teknis dan lokakarya di bidang proteksi tanaman sejak tahun 2011 serta pelatihan teknis mutu hasil pertanian sejak tahun 2017.

Penulis mendapatkan keahlian dan pengetahuan tambahan melalui berbagai pelatihan khususnya mengenai lalat buah, baik di dalam negeri maupun luar negeri, seperti di Jepang dan Australia. Beberapa kegiatan mengenai isu perlindungan hortikultura yang dilangsungkan di Jakarta maupun kota lain juga pernah diikuti oleh penulis.

Penulis menggeluti bidang pemasaran dan investasi, mendapat pengetahuan bidang perlindungan hortikultura (khususnya permasalahan dampak

perubahan iklim dan penanganannya) serta data OPT hortikultura melalui seminar/lokakarya baik dalam jaringan (*online*) maupun luring (*offline*) yang diselenggarakan oleh Kementerian Pertanian dan instansi terkait lainnya. Pada 2018, penulis pernah mengikuti studi banding proyek JICA ke Jepang terkait Rantai Nilai Hortikultura.

Penulis pernah mengikuti berbagai seminar dan workshop baik nasional maupun international. Forum international yang pernah diikuti, antara lain forum APEC Climate Center (APPC), APEC Climate Symposium (APCS), Ad-Hoc Steering Committee On Climate Change And Food Security, ASEAN-CRN Meeting, ASEAN-CRN Workshop on Promoting Climate-Smart Agriculture (CSA) Practices, ASEAN Technical Working Group on Agricultural Research & Development (ATWGARD), dan pertemuan lainnya. Penulis juga pernah menjadi anggota delegasi Indonesia (DELRI) dalam The 34th FAO Asia Pacific Regional Conference (APRC) meeting di Fiji, Jepang.

Penulis pernah mengikuti pelatihan *Thermal Treatment for Disinfestation of Fruit Flies implemented by Japan Fumigation Technology Association and Naha Plant Protection Station*, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan pada tanggal 12 Mei–8 September 2017. Penulis juga mengikuti *the 11th International Symposium on Fruit Flies of Economic Importance* di Macquarie University, Sydney, Australia pada 13–18 November 2022. Beberapa kegiatan nasional maupun internasional terkait Proteksi Tanaman juga pernah diikuti oleh penulis baik dalam jaringan (*online*) maupun luring (*offline*).

Penulis, sejak tahun 2022, menjadi periset pada Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, BRIN, dengan bidang riset Perubahan Iklim, Iklim Urban, dan Pembangunan Berkelanjutan. Sebelumnya, pada tahun 2021–2022 menjadi Kepala Balai dan Plt. Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Maluku Utara, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian. Pada tahun 2013–2021 sebagai Ketua Kelompok Peneliti Agroklimat di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi. Telah menghasilkan lebih dari 50 artikel ilmiah yang didiseminasi pada berbagai pertemuan ilmiah, dan dipublikasikan pada prosiding seminar, jurnal ilmiah nasional dan internasional. Sebanyak 19 buku dan 13 paten telah dihasilkan oleh penulis. Penulis

pernah menjadi Asesor dan Tim Penilai Peneliti Unit (TPPU), pernah bekerja sama penelitian dengan FAO sebagai koordinator dan sebagai penanggung jawab kerja sama dengan Ibaraki University, Jepang.

Rahmawati

Rahmawati lahir di Mataram, 7 Oktober 1967 dari pasangan Drs. H. Mas'ud Zakaria dan Hj. Siti Ramlah. Penulis menempuh pendidikan S-1 Jurusan Tanah dan Pemupukan di Universitas Mataram pada tahun 1992, lulus pendidikan S-2 Manajemen Agribisnis di Institut Pertanian Bogor pada tahun 2004, dan lulus pendidikan S-3 Pertanian Komunikasi Pembangunan Pertanian dan Pedesaan di Institut Pertanian Bogor pada tahun 2017. Atas pengabdian dan jasanya, penulis telah meraih Tanda Kehormatan Satya Lancana Karya Satya XX Tahun dari Presiden RI pada 14 Agustus 2016.

Ridha Rahmat

Ridha Rahmat menempuh pendidikan S-1 jurusan statistika di Universitas Padjajaran. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG sebagai analis dan *forecaster* di Subbidang Peringatan Dini Iklim, BMKG (2018–sekarang).

Robi Muharsyah

Robi Muharsyah adalah pakar di bidang klimatologi dengan latar belakang pendidikan S-1 Matematika Universitas Andalas dan S-2 Sains Kebumian ITB. Penulis memiliki pengalaman kerja di BMKG, di antaranya bertugas di Balai Besar Wilayah V Jayapura, Papua (2008–2011) dan di Subbidang Analisa dan Informasi Iklim, Kedeputian Bidang Klimatologi, BMKG Pusat (2011–2024).

Saat ini, beliau menjadi staf pengajar di Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, UGM, dengan mata kuliah yang diampu Agroklimatologi, Ilmu Lingkungan, Sistem Informasi Geografi, dan Pemetaan Wilayah, baik di program S-1, S-2, maupun S-3. Beberapa penelitian sudah diterbitkan di jurnal internasional serta menjadi reviewer di beberapa jurnal internasional seperti *Journal of Geography*, *Journal of Agricultural Sciences*, *International Journal of Agriculture and Crop Science*, *Paddy and Water Environment*, *Ecological Engineering and Environmental Technology*

serta Indonesian Journal of Geography. Saat ini beliau juga tergabung di beberapa asosiasi profesi, baik dalam maupun luar negeri, seperti di Perhimpunan Teknik Pertanian (Perteta), Asian Crop Science Association, Japan Meteorology Society, dan Agricultural Meteorology Society. Selain itu, beliau juga aktif sebagai penulis di beberapa media cetak dan online. Tahun 2016, beliau menjadi Staf Ahli Litbang Pertanian Kementerian Pertanian Republik Indonesia dan saat ini juga menjadi Tenaga Ahli di salah satu BUMN Pangan dan Ketua Dewan Pakar DPP Pemuda Tani Indonesia.

Seiring bertransformasinya Badan Litbang Pertanian menjadi Badan Standardisasi Instrumen Pertanian pada 2022, Penulis beralih jabatan fungsional dari peneliti ahli madya menjadi analis kebijakan ahli madya. Berbagai publikasi berupa karya ilmiah dan hasil penelitian telah diterbitkan dalam bahasa Indonesia dan Inggris pada jurnal ilmiah, semi ilmiah, serta prosiding.

Sejak tahun 1987, penulis bekerja sebagai Peneliti di Balai Penelitian Tanah, Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian. Pada Bulan Desember 2022-sekarang penulis bekerja sebagai peneliti ahli utama bidang Pengelolaan Lahan pada Organisasi Riset Pertanian dan Pangan, BRIN.

Sejak tahun 1987, penulis melakukan penelitian dan kajian bidang ilmu tanah, khususnya konservasi tanah dan rehabilitasi lahan. Selanjutnya, penulis aktif melakukan riset dan kajian tentang teknologi pengelolaan lahan untuk meningkatkan adaptasi dan mitigasi terhadap perubahan iklim. Hasil-hasil penelitian dan kajian yang dilakukan penulis telah diterbitkan baik dalam bentuk prosiding, buku, bagian dari buku, bunga rampai, jurnal nasional, maupun global.

Sejak tahun 1992, penulis bekerja sebagai peneliti di Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat (Puslittanak) yang selanjutnya bergabung di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi (Balitklimat), Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian (BBSDLP), Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian. Sejak Juni 2022-saat ini, penulis bekerja sebagai peneliti pada Kelompok Riset Perubahan Iklim

dan Pembangunan Berkelanjutan, Pusat Riset Riset Iklim dan Atmosfer, Organisasi Riset Kebumian dan Maritim, BRIN.

Sejak tahun 1992, penulis melakukan penelitian dan kajian di bidang iklim, hidrologi dan agroklimat, khususnya klimatologi terapan. Penulis aktif melakukan riset dan kajian tentang pengelolaan risiko iklim, kerentanan, asuransi indeks iklim, dan adaptasi perubahan iklim. Hasil-hasil penelitian dan kajian yang dilakukan penulis telah diterbitkan dalam bentuk prosiding, buku, artikel pada buku, bunga rampai, jurnal nasional maupun international, serta dalam bentuk Hak Kekayaan Intelektual (HAKI).

Sejak tahun 2009, penulis bekerja sebagai peneliti di Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat yang selanjutnya bergabung di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi, Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian. Pada Bulan Juni 2022-sekarang penulis bekerja sebagai peneliti pada Kelompok Riset Perubahan Iklim dan Pembangunan Berkelanjutan, Pusat Riset Riset Iklim dan Atmosfer, Organisasi Riset Kebumian dan Maritim, BRIN.

Sejak tahun 2009, penulis melakukan penelitian dan kajian di bidang iklim, hidrologi, dan agroklimat khususnya perubahan iklim dan model simulasi tanaman. Penulis aktif melakukan riset dan kajian tentang pengelolaan risiko iklim dan adaptasi perubahan iklim terhadap produksi tanaman. Hasil-hasil penelitian dan kajian yang dilakukan penulis telah diterbitkan dalam bentuk prosiding, buku, bagian dari buku, jurnal nasional, maupun international.

Slamet Riyadi

Slamet Riyadi merupakan staf fungsional ahli madya Pengendali Organisme Pengganggu Tumbuhan (POPT) di Direktorat Perlindungan Hortikultura Kementerian Pertanian. Penulis menyelesaikan pendidikan S-1 jurusan Ilmu Hama dan Penyakit Tumbuhan Fakultas Pertanian Universitas Hasanuddin tahun 1992 dan menyelesaikan S-2 di Fakultas Pertanian Universitas Hasanuddin Makassar bidang studi Sistem-Sistem Pertanian pada tahun 2007.

Suci Pratiwi

Suci Pratiwi menempuh pendidikan D-4 Klimatologi di Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG sebagai analis dan *forecaster* iklim di Subbidang Peringatan Dini Iklim, BMKG (2018–sekarang).

Suciantini

Suciantini merupakan peneliti di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer (PRIMA) BRIN sejak tahun 2022. Sebelumnya, penulis merupakan peneliti ahli madya bidang tanah, agroklimat dan hidrologi di Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian. Di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, saat ini penulis tergabung di Kelompok Riset Perubahan Iklim dan Pembangunan Berkelanjutan. Penulis menyelesaikan Pendidikan dari S-1–S-3 di Institut Pertanian Bogor. Pendidikan S-3 diselesaikan pada program studi Klimatologi Terapan. Lingkup riset penulis di antaranya terkait adaptasi perubahan iklim dan pengelolaan risiko iklimnya pada sektor pertanian. *E-mail:* ser022@brin.go.id.

Supari

Supari adalah pakar di bidang klimatologi dengan latar belakang pendidikan D-3 Meteorologi- Akademi Meteorologi dan Geofisika; S-1 Fisika, Universitas Indonesia; S-2 Ilmu Lingkungan, Universitas Gadjah Mada; dan S-3 Environmental Science, National University of Malaysia. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG tahun 2000–2013 di Stasiun Meteorologi Pangkalpinang. Sejak tahun 2014–saat ini, penulis aktif bekerja di Bidang Analisis Variabilitas Iklim, Kedeputian Bidang Klimatologi, BMKG.

Syahru Romadhon

Syahru Romadhon adalah pakar klimatologi dengan latar belakang pendidikan S-1 Meteorologi, Institut Pertanian Bogor dan S-2 Klimatologi Terapan, Institut Pertanian Bogor. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG sebagai analis dan *forecaster* dinamika atmosfer-laut dan iklim ekstrem di Subbidang Peringatan Dini Iklim (2008–sekarang).

Tania June

Tania June memperoleh gelar insinyur dari program studi Agrometeorologi IPB dan menjadi dosen di Departemen Geofisika dan Meteorologi sejak 1988 hingga saat ini. Penulis mendapat beasiswa dari International Development Program, Australia untuk pendidikan master (S-2) di School of Agriculture and Food Sciences, University of Queensland, Brisbane, Australia dan memperoleh gelar Master pada tahun 1991 di bidang pertanian (*agriculture*). Kemudian, penulis mendapatkan beasiswa dari AUSAID untuk melanjutkan pendidikan jenjang doktoral (S-3) di Research School of Biological Sciences, pada bidang *environmental biology* di Australian National University Australia dan mendapat Gelar Ph.D di bidang *plant sciences* pada tahun 2002.

Penulis telah membimbing penelitian dan meluluskan 87 orang mahasiswa S-1, 45 orang mahasiswa S-2, dan 10 orang mahasiswa S-3, saat ini penulis ditugaskan menjadi penanggungjawab dan pengajar pada mata kuliah “Mikrometeorologi” (S-1), “Pertanian Inovatif” (S-1); “Geofisika Lingkungan” (S-2), “Iklim Mikro” (S-2), “Pertanian Cerdas Iklim” (S-2/S-3), “Bioklimatologi” (S-2/S-3), “Bioklimatologi Lingkungan” (S-2/S-3), serta “Perubahan Lingkungan Global dan Mitigasi Bencana” (S-3).

Penelitian yang dilakukan penulis berfokus pada proses biogeofisik dan biogeokimia, mencakup pertukaran energi, bahan laien, dan evapotranspirasi serta bahan terasa dan pertukaran CO₂ pada permukaan bervegetasi (khususnya hutan dan tanaman pertanian). Penulis telah memperoleh sertifikasi Dosen Profesional di Bidang Kebumian dan Angkasa pada tahun 2009 dan diangkat menjadi Guru Besar di bidang ilmu Geofisika dan Meteorologi sejak 1 Desember 2020. Penulis mengembangkan dan menjadi penanggungjawab MK Pertanian Cerdas Iklim (*Climate Smart Agriculture*) di PS Klimatologi Terapan GFM Institut Pertanian Bogor dan buku ini dikembangkan dari bahan yang diajarkan pada MK tersebut.

Tiar Maharani

Tiar Maharani merupakan pakar dalam analisis variabilitas iklim dengan latar belakang pendidikan S-1 Matematika Universitas Gadjah Mada dan S-2 Geografi Universitas Gadjah Mada. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG selama sebelas tahun (2013–2024) di Subbidang Analisa dan

Informasi Iklim, BMKG. Penulis memiliki keahlian mengerjakan produk rutin operasional analisis variabilitas iklim mengenai analisis dan prakiraan curah hujan dasarian, bulanan, dan musim.

Untuk menambah pengetahuan di bidang proteksi tanaman, penulis pernah mengikuti beberapa kegiatan nasional maupun internasional terkait Proteksi Tanaman melalui kegiatan pelatihan teknis serta seminar-seminar baik secara langsung (luring) maupun *online* (daring).

Woro Estiningtyas

Woro Estiningtyas dilahirkan di Kota Nganjuk, Provinsi Jawa Timur, 8 Oktober 1967. Menyelesaikan pendidikan S-1 pada program studi Agrometeorologi di Institut Pertanian Bogor tahun 1992 dengan kajian skripsi tentang *Penentuan Waktu Panen Tanaman Tebu Berdasarkan Akumulasi Bahang*. Melanjutkan pendidikan S-2 pada program studi Sains Atmosfer di Institut Teknologi Bandung dan lulus tahun 2004 dengan penelitian berjudul *Prediksi Curah Hujan dengan Metode Filter Kalman Mendukung Perencanaan Tanam*. S-3 dengan judul *Pengembangan Model Asuransi Indeks Iklim untuk Meningkatkan Ketahanan Petani Padi dalam Menghadapi Perubahan Iklim*.

Yayan Apriyana

Yayan Apriyana dilahirkan di Kabupaten Indramayu, 10 Maret 1966. Penulis menempuh pendidikan S-1 Program Studi Agronomi (Ilmu Tanah), Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto (1984–1990) dengan kajian skripsi tentang *Pengaruh Pemberian Mulsa pada Berbagai Tingkat Kadar Air Tanah terhadap Kebutuhan Air, Pertumbuhan, dan Produksi Tanaman Kacang Tanah (Arachis hypogaea L.) pada Tanah Podzolik Merah Kuning*. Melanjutkan S-2 Ilmu Agronomi, Program Pascasarjana di Centre National D'études Agronomiques Des Régions Chaudes (CNEARC), Montpellier Prancis, (2001–2003) dengan kajian tesis tentang Kontribusi Analisis Agroklimat pada Evaluasi Kemungkinan Pengembangan Tanaman Sayuran di Dua Wilayah yang Berbeda Secara Ekologis di Jawa, Indonesia (kasus Pagerejo, Jawa Tengah dan Selopamioro, Yogyakarta), dan menempuh S-3 bidang Klimatologi Terapan, Sekolah Pascasarjana IPB (2006–2011), dengan kajian disertasi tentang Penetapan Kalender Padi Berdasarkan

Fenomena El Niño–Southern Oscillation (ENSO) dan IOD (Indian Ocean Dipole) di Wilayah Monsunal dan Equatorial. Pada tahun 2013 melanjutkan Post Doctoral di Georg-August-Universität Göttingen, Jerman.

Yeli Sarvina

Yeli Sarvina memperoleh gelar S-1 Sains jurusan Meterologi FMIPA IPB pada tahun 2005. Pada tahun 2015 melanjutkan pendidikan S-2 pada bidang Flood Risk Management, Erasmus Mundus Program. Pendidikan ini ditempuh di empat perguruan tinggi pada empat negara, yaitu (1) UNESCO IHE Institute for Water Education (Belanda), (2) Technical University of Dresden (Jerman), (3) Technical University of Catalonia (Spanyol), dan (4) University of Ljubljana (Slovenia). Melanjutkan pendidikan S-3 pada program Ilmu Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan (PSL) Institut Pertanian Bogor pada tahun 2018 dan meraih gelar doktor pada tahun 2022. Pada tahun 2008 penulis memulai karir di BMKG tepatnya di stasiun Meteorologi Kelas 1 Biak, Papua dan pindah ke Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pertanian pada 2009. Pada tahun 2022 bergabung dengan Pusat Riset Iklim dan Atmosfer Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

Yohanes Agung Kristomo

Yohanes Agung Kristomo menempuh pendidikan D-4 Klimatologi di Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. Penulis memiliki pengalaman bekerja di BMKG sebagai analis dan *forecaster* Dinamika Atmosfer-Laut dan Iklim Ekstrem, BMKG (2022–sekarang).

Yudi Riadi Fanggidae

Yudi Riadi Fanggidae merupakan peneliti ahli pertama di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Organisasi Riset Kebumian dan Maritim BRIN. Sebelumnya, penulis bertugas sebagai peneliti di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi, Kementerian Pertanian. Penulis menempuh pendidikan S-1 di Departemen Geofisika dan Meteorologi, IPB dengan jurusan mayor Meteorologi Terapan dan minor Agronomi dan Hortikultura. Kemudian, penulis memperoleh gelar Magister Klimatologi Terapan pada program pascasarjana IPB. Fokus penelitian penulis adalah pada bidang agroklimatologi, interaksi

antara iklim-cuaca dan tanaman, serta adaptasi perubahan iklim. Topik-topik dari karya yang telah dipublikasikan penulis, baik secara nasional maupun internasional adalah tentang penentuan kebutuhan air; efisiensi pemanfaatan air dan efisiensi pemanfaatan radiasi oleh tanaman; pengaruh kondisi iklim terhadap pertumbuhan, pola tanam, dan serangan hama; dampak perubahan iklim dan lingkungan terhadap pergeseran fase fenologi; serta model distribusi spasial berdasarkan proyeksi iklim dan kondisi bioklimatik di masa mendatang.

Yuliastuti Purwaningsih

Yuliastuti Purwaningsih memperoleh gelar sarjana pertanian pada 1991 Jurusan Budidaya Pertanian di Universitas Kristen Satya Wacana Salatiga. Pada 2012, secara mandiri menjalani S-2 pada program studi Pemasaran Institut Pengembangan Wirausaha Jakarta (IPWIJA). Penulis memiliki jabatan fungsional Pengendali Organisme Tumbuhan (POPT) Muda di Direktorat Perlindungan Hortikultura Kementerian Pertanian.

Indeks

- adaptasi, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 15, 17, 20, 30, 35, 38, 40, 42, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 54, 60, 73, 74, 84, 87, 113, 120, 127, 129, 131, 132, 147, 197, 198, 200, 202, 203, 204, 205, 220, 296, 297, 319, 322, 324, 325, 326, 330, 331, 334, 335, 337, 347, 348, 354, 360, 365, 366, 369, 370, 375, 394, 395, 396, 397, 402, 407
- agile scrum, 308, 407
- agile software development, 308, 407
- air tanah, 93, 296, 326, 327, 328
- algoritma, 101, 138, 143, 308, 310, 311
- aneka cabai, 291, 292, 293, 309, 314
- angin monsun, 110, 111, 122, 154, 294, 412
- antartropis, 294, 408
- aplikasi, 408, 411, 413
- Asia, 412
- Australia, 412
- banjir, 408
- bawang merah, 291, 292, 293, 298, 301, 303, 304, 305, 306, 307, 309, 314, 317, 319
- bawang putih, 291
- biaya produksi, 25, 292, 296
- BMKG, 2, 9, 42, 61, 108, 109, 110, 115, 120, 128, 130, 132, 140, 141, 142, 144, 146, 149, 159, 160, 161, 163, 164, 165, 166, 168, 169, 171, 172, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 185, 187, 188, 189, 190,

- 274, 295, 297, 312, 319, 328, 330, 333, 349, 398, 399, 401, 402, 403, 415
- buah, 254, 295, 326, 335, 409
- budi daya, 72, 75, 87, 121, 128, 148, 196, 197, 198, 295, 296, 297, 301, 305, 306, 307, 327, 337, 342, 345, 353, 354, 355, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 369, 370, 373, 374, 375, 376, 378, 379, 380, 381, 409, 410
- cabai besar, 292, 293
- cabai merah, 314, 317
- cabai rawit, 292, 293, 314, 317
- curah hujan, 2, 3, 7, 8, 9, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 38, 47, 48, 49, 51, 59, 60, 61, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 74, 75, 76, 80, 82, 90, 99, 106, 107, 108, 111, 114, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 128, 129, 133, 134, 136, 138, 140, 141, 142, 143, 145, 147, 148, 154, 156, 160, 161, 162, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 175, 177, 178, 179, 181, 182, 183, 185, 186, 190, 195, 196, 197, 201, 204, 209, 210, 211, 212, 213, 217, 218, 219, 221, 265, 294, 295, 297, 298, 299, 300, 302, 303, 304, 305, 306, 309, 312, 318, 319, 321, 324, 325, 329, 365, 366, 367, 368, 369, 372, 375, 380, 393, 394, 396, 397, 399, 401, 402, 403, 409, 411, 413
- daging ayam, 291
- daging sapi, 291
- dampak perubahan iklim, xviii, xx, 2, 3, 7, 11, 15, 17, 20, 25, 29, 38, 39, 46, 47, 48, 50, 51, 54, 55, 59, 73, 83, 119, 121, 125, 126, 127, 129, 142, 147, 197, 203, 206, 220, 293, 296, 301, 309, 314, 320, 322, 323, 324, 330, 331, 394, 395, 396, 397, 408
- data iklim, 103, 139, 178, 189, 203, 205, 207, 216, 218, 219, 297, 299, 321, 356, 400, 402
- dataran tinggi, 92, 303, 306, 307, 369, 387
- desain aplikasi, 309, 310, 408
- diseminasi, 144, 168, 189, 298, 382
- DPI, 11, 293, 294, 408
- Early Warning System, 11, 293, 294, 314, 402
- elisitasi kebutuhan, 309
- El Niño Southern Oscillation (ENSO), 160, 265, 294, 409
- empiris, 134, 135, 136, 138, 139, 301, 411
- endemik, 301, 413
- epidemik, 301
- EWS, 11, 291, 293, 294, 298, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 320, 402, 408
- EWS SIPANTARA, 291, 294, 298, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 320
- fenomena global, 9, 294
- fitur, 310

- fluktuasi harga, 292
- GeoAI, 311, 312, 320, 409
- hama penyakit tanaman, 57, 87, 156, 300, 301, 320
- harga, 127, 198, 199, 292, 343, 394
- hortikultura, 410
- iklim ekstrem, 17, 18, 19, 24, 25, 28, 38, 46, 48, 49, 50, 120, 123, 125, 126, 128, 133, 156, 159, 203, 296, 297, 298, 318, 325, 409
- ilmiah, xvii, 8, 9, 129, 131, 133, 168, 225, 317, 362, 382
- Indian Ocean Dipole (IOD), 111, 123, 294, 410
- Indonesia, xvii, 1, 2, 8, 9, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 24, 25, 26, 28, 29, 31, 33, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 46, 48, 49, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 70, 71, 84, 85, 86, 87, 90, 103, 110, 111, 112, 113, 114, 116, 117, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 130, 133, 140, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 154, 155, 156, 157, 159, 160, 161, 162, 163, 167, 169, 171, 177, 178, 182, 184, 185, 186, 187, 189, 190, 192, 193, 196, 198, 199, 200, 211, 213, 220, 221, 222, 223, 263, 264, 274, 275, 286, 291, 292, 294, 295, 296, 297, 302, 312, 316, 318, 319, 323, 324, 331, 333, 334, 335, 336, 337, 346, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 363, 365, 366, 367, 369, 370, 371, 373, 375, 376, 379, 380, 381, 382, 383, 387, 388, 389, 393, 394, 398, 399, 402, 403, 404, 409, 410
- inflasi, 292
- informasi iklim, 11, 41, 50, 130, 131, 146, 148, 190, 295, 296, 297, 331, 397
- integrasi sains, 296
- intensitas curah hujan, 24, 27, 49, 123, 129, 302, 303, 393
- internet of things, 10, 202, 296, 298, 299, 318, 319, 366, 410
- irigasi, 3, 7, 25, 32, 35, 36, 39, 42, 52, 54, 73, 74, 83, 86, 127, 128, 129, 196, 216, 217, 218, 219, 220, 296, 300, 303, 305, 306, 324, 325, 327, 328, 329, 331, 332, 336, 341, 342, 352, 356, 357, 359, 360, 361, 362, 365, 366, 371, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 388, 402, 403
- jadwal tanam, 121, 293, 294, 296, 302, 309, 314, 317, 328, 376, 402
- jagung, 2, 8, 20, 25, 27, 29, 30, 32, 33, 34, 36, 37, 39, 40, 59, 61, 63, 64, 65, 66, 73, 75, 76, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 126, 144, 197, 211, 212, 214, 215, 216, 291, 394, 396, 397
- kawasan penyangga nasional, 293
- kecerdasan buatan, 4, 9, 10, 143, 148, 202, 291, 296, 297, 311, 409, 410
- kedelai, 2, 20, 25, 27, 29, 33, 34, 36, 37, 144, 291, 396

- kekeringan, xix, 2, 3, 7, 8, 11, 18, 24, 25, 27, 28, 29, 39, 44, 49, 55, 66, 67, 68, 69, 70, 83, 113, 120, 121, 123, 125, 126, 127, 128, 133, 143, 144, 145, 147, 148, 156, 196, 198, 202, 208, 209, 220, 222, 227, 293, 294, 295, 296, 298, 299, 300, 309, 312, 314, 316, 317, 318, 324, 325, 328, 329, 332, 335, 336, 348, 360, 372, 394, 396, 402, 408
- kelembapan, 2, 10, 90, 119, 120, 122, 125, 133, 136, 196, 201, 212, 216, 220, 225, 226, 227, 228, 230, 231, 232, 238, 239, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 250, 251, 252, 253, 255, 256, 257, 258, 263, 264, 265, 266, 267, 271, 273, 277, 279, 281, 282, 284, 285, 287, 294, 296, 300, 365, 366, 367, 368, 369, 380, 401, 408
- keragaman iklim, 160, 187, 294
- kesejahteraan petani, 38, 45, 50, 66, 292, 382
- ketahanan pangan, xviii, xx, 1, 3, 6, 7, 9, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 24, 25, 30, 32, 36, 38, 39, 44, 45, 46, 47, 50, 51, 52, 56, 59, 60, 66, 89, 119, 121, 122, 127, 129, 131, 132, 155, 159, 195, 196, 199, 200, 211, 212, 216, 219, 223, 253, 254, 256, 263, 265, 286, 291, 297, 319, 321, 322, 324, 325, 328, 329, 331, 335, 336, 338, 348, 349, 353, 354, 355, 358, 370, 380, 381, 382, 393, 394, 399, 402, 403, 404
- ketersediaan air, 6, 24, 25, 33, 38, 39, 50, 63, 74, 82, 83, 119, 198, 207, 208, 209, 212, 213, 219, 220, 300, 306, 324, 397, 399
- khatulistiwa, 410
- komoditas, 2, 51, 63, 64, 65, 84, 121, 128, 133, 149, 202, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 218, 254, 291, 292, 293, 294, 298, 302, 309, 314, 349, 412
- komoditas strategis, 292, 294
- korelasi, 63, 65, 82, 135, 211, 221, 237, 285, 300, 307, 395
- kuadratik, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 283, 287, 303
- lahan kering, 33, 51, 54, 55, 86, 213, 303, 304, 306, 369, 370, 396
- lahan tadah hujan, 303, 306, 373
- La Niña, 16, 17, 18, 25, 26, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 47, 48, 49, 50, 54, 60, 66, 68, 70, 108, 114, 123, 126, 127, 134, 154, 157, 179, 185, 294, 295, 347, 374, 393, 394, 395, 396, 410
- linear, 134, 136, 139, 153, 178, 227, 228, 233, 237, 241, 303
- luas tambah tanam, 302, 303, 304, 305, 309
- luas tanam, 18, 27, 33, 35, 37, 49, 298, 303, 307, 319, 394
- meteorologi, 8, 11, 167, 269, 272, 283, 295, 301, 403

- mikrokontroler, 298
minyak goreng, 291
mitigasi, xx, 6, 10, 11, 38, 45, 108, 113, 127, 129, 130, 131, 197, 198, 202, 203, 204, 205, 215, 220, 292, 293, 294, 296, 312, 314, 319, 321, 322, 325, 327, 335, 337, 347, 348, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 362, 365, 377, 379, 381, 382, 394, 395, 396, 402
mockup, 309
model, xx, 4, 5, 8, 9, 10, 12, 21, 83, 89, 90, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 120, 121, 125, 130, 131, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 141, 142, 143, 148, 150, 152, 154, 155, 157, 159, 167, 168, 170, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 186, 187, 189, 191, 192, 204, 206, 209, 210, 211, 212, 220, 221, 222, 226, 227, 228, 233, 235, 236, 237, 238, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 250, 251, 253, 254, 256, 257, 259, 263, 264, 265, 266, 269, 273, 276, 277, 278, 280, 281, 283, 284, 286, 287, 288, 298, 299, 300, 301, 309, 319, 321, 329, 333, 335, 355, 356, 358, 386, 387, 394, 395, 398, 399, 400, 401, 403, 408, 411, 416
model hubungan, 298, 300, 301, 309
model peringatan dini, 301
model regresi, 134, 237, 301
monsun, 29, 67, 110, 111, 113, 122, 154, 160, 161, 165, 264, 294, 412
musim hujan, 27, 28, 31, 48, 61, 66, 67, 68, 84, 111, 113, 121, 122, 129, 140, 144, 159, 160, 162, 163, 164, 165, 166, 171, 172, 173, 181, 183, 184, 187, 188, 189, 201, 211, 293, 295, 297, 301, 305, 306, 319, 371, 411
musim kemarau, 24, 27, 28, 29, 35, 48, 61, 66, 67, 68, 69, 72, 84, 111, 121, 122, 129, 140, 144, 159, 162, 163, 164, 165, 166, 170, 171, 172, 173, 181, 182, 183, 184, 186, 187, 188, 190, 196, 201, 211, 293, 295, 297, 301, 368, 371, 394, 396, 398, 411
naungan, 129, 296, 334
off season, 292, 293, 411
OPT, 11, 17, 27, 28, 29, 31, 34, 36, 49, 125, 126, 128, 143, 148, 196, 221, 293, 294, 297, 298, 300, 301, 302, 308, 309, 314, 316, 328, 343, 397, 402, 403, 408, 411, 416
organisme pengganggu tumbuhan, 293, 301, 411, 416
padi, 2, 8, 12, 16, 18, 19, 20, 24, 25, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 42, 51, 52, 54, 55, 56, 59, 61, 63, 64, 65, 66, 72,

- 73, 74, 75, 76, 77, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 121, 126, 127, 144, 149, 152, 155, 156, 197, 201, 202, 211, 214, 218, 223, 291, 306, 307, 326, 336, 337, 342, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 378, 379, 380, 381, 382, 387, 388, 389, 394, 396, 397, 403
- palawija, 34, 54, 72, 73, 75, 82, 306
- pangan, iv, xvii, xviii, xix, xx, 1, 2, 3, 6, 7, 9, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 36, 38, 39, 44, 45, 46, 47, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 59, 60, 66, 67, 84, 89, 90, 108, 114, 119, 121, 122, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 141, 144, 147, 148, 155, 156, 157, 159, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 202, 211, 212, 216, 218, 219, 223, 225, 226, 227, 253, 254, 255, 256, 263, 265, 286, 291, 292, 295, 296, 297, 319, 321, 322, 324, 325, 328, 329, 331, 332, 334, 335, 336, 338, 340, 348, 349, 353, 354, 355, 358, 370, 377, 380, 381, 382, 393, 394, 395, 396, 399, 402, 403, 404
- parameter, xx, 2, 10, 49, 99, 106, 123, 124, 137, 139, 152, 168, 171, 172, 174, 175, 176, 177, 188, 190, 201, 227, 228, 237, 256, 257, 264, 265, 266, 267, 270, 272, 298, 301, 303, 309, 317, 355, 400
- parameter iklim, xx, 10, 49, 99, 123, 124, 139, 171, 177, 228, 256, 264, 267, 298, 301, 400
- pasokan, xix, 6, 18, 34, 127, 129, 196, 199, 292, 293, 295, 354, 363
- peluang, 24, 32, 35, 39, 90, 107, 108, 109, 129, 140, 145, 147, 203, 257, 272, 274, 292, 294, 298, 331, 333, 354, 358, 365, 396, 397
- pemanasan global, 12, 16, 51, 89, 125, 203, 295, 393
- pemanfaatan informasi iklim, 131, 296, 297
- pemupukan, 3, 55, 128, 143, 220, 297, 342, 343, 388
- pengaturan jadwal tanam, 293, 294
- pengaturan tata air, 306, 307
- pengembangan aplikasi, 308, 309, 411
- perancangan, 408, 413
- persamaan, 411
- pertanian, 407, 412
- pola curah hujan, 411
- produksi, 412
- produktivitas, 412
- programmer, 309, 310
- puncak tanam, 304
- PWA, 310
- radiasi, 31, 72, 73, 92, 93, 98, 120, 129, 136, 265, 266, 296, 401
- real time, 294, 403
- remote sensing, 221, 299, 412
- Samudra Hindia, 60, 111, 113, 122,

- 123, 124, 143, 160, 264, 286, 294
- Samudra Pasifik, 60, 108, 109, 123, 124, 134, 143, 160, 185, 264, 286, 294, 409, 410
- sawah tada hujan, 35, 86, 304, 306
- sayuran, 291, 306, 307, 326, 335, 409
- scrum, 308, 407
- sensor ultrasonik, 298, 320, 412
- sentra penyanga, 294
- serangan hama, 7, 29, 57, 66, 82, 119, 120, 156, 197, 198, 211, 300, 301, 320, 335
- SIPANTARA, 11, 291, 294, 298, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 320, 402
- Sistem Informasi Kalender Tanam, 143, 144, 148, 399, 416
- sistem peringatan dini, 205, 297, 298, 299, 301, 328, 329, 331, 333, 348, 403, 404, 408
- smart farming, 296, 412
- spasial, 7, 28, 99, 106, 107, 110, 112, 130, 139, 142, 161, 177, 178, 182, 188, 189, 195, 207, 208, 209, 213, 216, 219, 220, 226, 263, 266, 270, 309, 311, 312, 313, 314, 356, 357, 372, 399, 400, 401, 408
- stok, 2, 293
- strategis, 3, 15, 17, 38, 44, 148, 198, 200, 291, 292, 294, 397
- suhu, xvii, 2, 3, 4, 7, 20, 21, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 38, 48, 49, 51, 59, 60, 61, 91, 98, 109, 119, 120, 122, 124, 125, 126, 128, 133, 136, 138, 147, 166, 167, 178, 179, 185, 186, 195, 196, 198, 201, 204, 212, 216, 221, 226, 227, 230, 231, 232, 254, 255, 265, 272, 294, 296, 300, 321, 324, 328, 329, 365, 367, 368, 369, 380, 395, 396, 400, 401, 402, 409, 410, 412, 413
- suhu permukaan laut, 133, 167, 178, 186, 221, 265, 294, 395, 400, 401, 402, 409, 410
- sumber daya air, 3, 7, 17, 20, 24, 25, 31, 32, 120, 195, 196, 300, 348, 362, 371, 372, 376, 377, 379, 381
- surjan, 35, 57, 305, 397
- surplus, 73, 76, 77, 196, 209, 293
- tanaman hias, 409
- teknologi, 409, 410, 411
- teknologi otomasi digital, 296
- teknologi tepat guna, 296
- telur, 291
- tools Figma, 309
- topografi, 31, 111, 112, 122, 143, 160, 176, 299
- trial and error, 309
- tropis, 121, 122, 124, 125, 134, 185, 263, 264, 265, 270, 274, 286, 294, 365, 401, 408, 409, 410
- usability, 311, 412
- usaha tani, 19, 38, 40, 50, 53, 147, 148, 292, 334, 347
- variabel respons, 301
- variabilitas iklim, 2, 112, 121, 123, 124, 125, 203, 301, 325, 346, 413

varietas, 3, 6, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 49, 74, 83, 85, 121, 127, 128, 144, 296, 306, 307, 324, 329, 333, 335, 336, 360, 367, 370, 372, 373, 374, 380, 387, 388, 397
Web API, 310
withbox testing, 310, 413

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Ketahanan pangan kini menjadi isu yang semakin mendesak seiring tantangan global yang dipicu oleh perubahan iklim. Negara-negara di seluruh dunia, termasuk Indonesia, dihadapkan pada risiko serius terkait produksi pangan, terutama karena ketergantungan mereka pada sektor pertanian. Perubahan kondisi lingkungan akibat perubahan iklim serta fenomena cuaca ekstrem dapat menyebabkan fluktuasi hasil pertanian. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu dapat memperpendek masa pertumbuhan tanaman, mengurangi produksi panen, dan berdampak pada kualitas tanah.

Buku *Prediksi Iklim untuk Ketahanan Pangan* hadir untuk hadir untuk membuka, menginformasikan, dan memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang dampak perubahan iklim dan dampaknya bagi sektor pangan. Buku ini berisi esai-esai yang mengeksplorasi isu-isu terkait, termasuk bagaimana sistem prediksi iklim berkembang seiring dengan kemajuan teknologi komputasi. Buku ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber referensi bagi peneliti atau akademisi serta masyarakat luas untuk pembelajaran terkait iklim dan ketahanan pangan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Gedung B.J. Habibie Lt. 8,
Jln. M.H. Thamrin No. 8,
Kota Jakarta Pusat 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.1244



ISBN 978-602-6303-49-3



9 78602 303493