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.

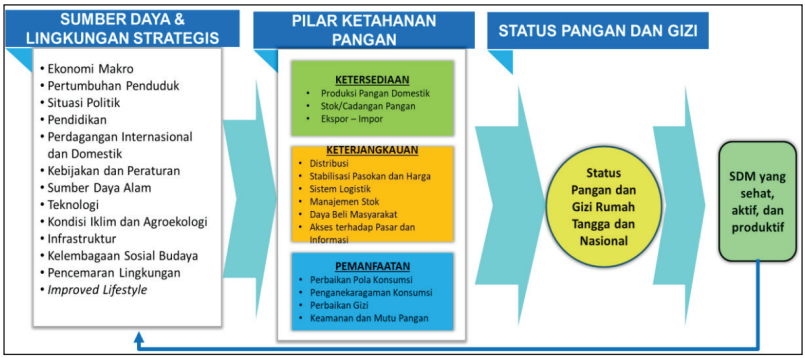
Kebutuhan sistem prediksi dan pemodelan iklim juga diperlukan di daerah lainnya, tidak hanya di NTT. Fenomena perubahan iklim berpengaruh besar pada sektor pertanian secara nasional, khususnya di subsistem hulu, yaitu pada sistem budi daya pertanian, di mana suhu dan ketersediaan air hujan menjadi faktor 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."

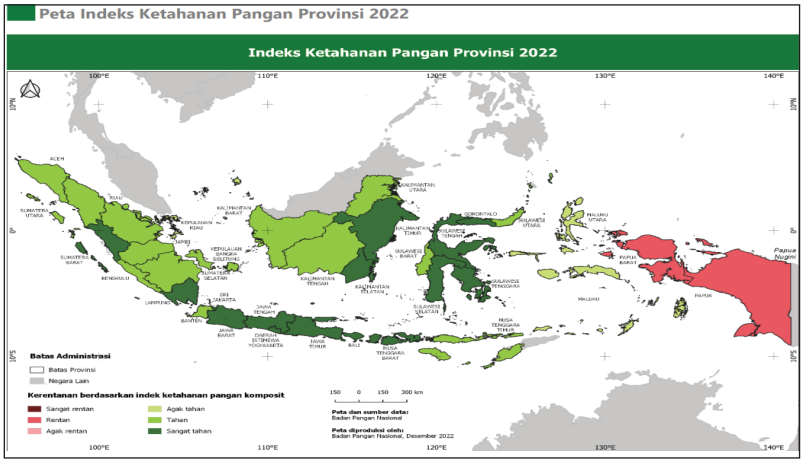
Indonesia dalam Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals, SDGs), berkomitmen untuk mewujudkan 17 target. SDGs pertama, yakni tanpa kemiskinan; yang kedua adalah mengakhiri kelaparan melalui ketercapaian pada ketahanan pangan; memperbaiki nutrisi; dan mempromosikan pertanian yang 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, realistis 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)

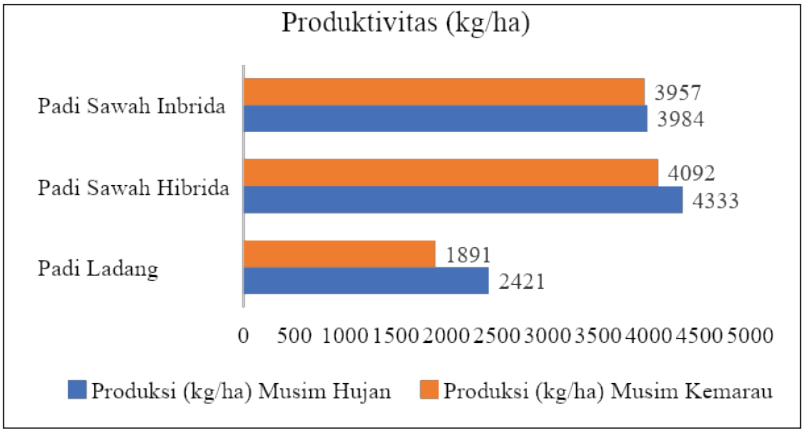
Gambar 7.2 Peta Indeks Ketahanan Pangan Provinsi 2022

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 temasuk 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 CO_2, metana, dan dinitrogen oksida) dari

berbagai sumber (energi, transportasi, industri, pertanian). Data ini membantu melacak kemajuan dan mengidentifikasi area yang perlu dipriositaskan 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 CO_2 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.

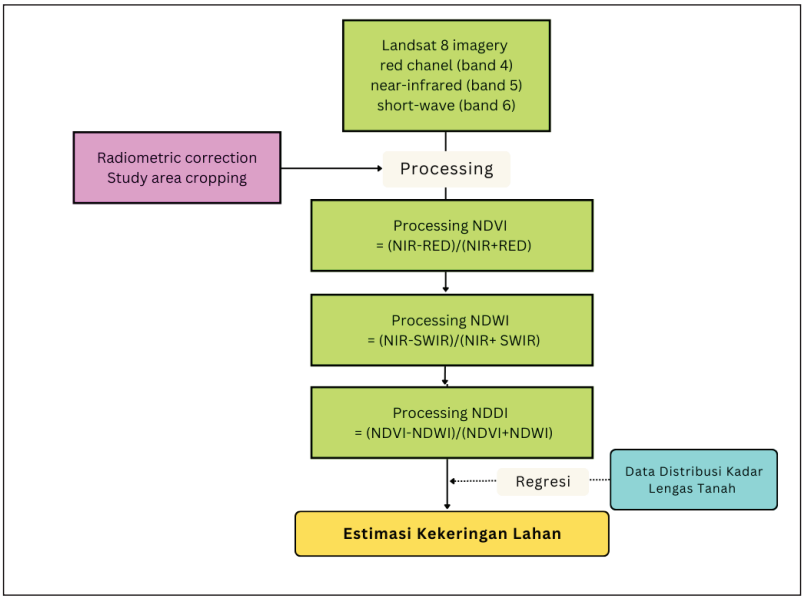
Berbagai platform pengindraan jauh berbasis ruang telah berkontribusi dalam meningkatkan pengetahuan kita tentang sistem iklim. Kandungan informasi dari berbagai sensor satelit tersebut telah meningkat secara eksponensial dalam beberapa dekade terakhir. Produk pengindraan jauh sering kali bersifat interdisipliner 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*, dan *dry*. Pengkelasan 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*, jarin-

gan syaraf tiruan (*artificial neural network*). Namun, metode-metode tersebut tidak mempertimbangkan ketergantungan jangka panjang dan efek musiman. Sifat ketergantungan jangka panjang dapat dideteksi 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 penyinaran 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 CO_2 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 kesesuain lahan ini dibagi ke dalam S-1 (sangat sesuai), S-2 (cukup sesuai), S-3 (sesuai marjinal), dan N (tidak sesuai). Pembagian pengkelasan 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 H_2O	Bahan organik		HCL 25%		Olsen
	Pasir	Debu	Liat		C	N	P_2O_5	K_2O	P_2O_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 terlampau rendah dan dapat diberikan input pengapuran untuk menetralkannya.

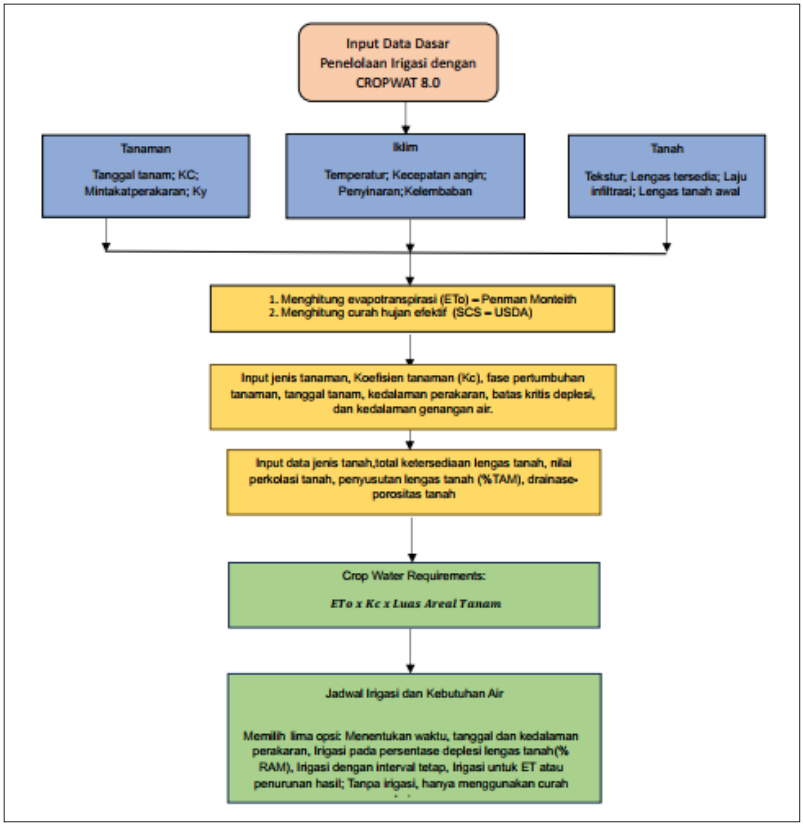
Namun, kesesuaian lahan pada era perubahan iklim adalah sesuatu tantangan karena kondisi lahan terutama aspek cuaca yang berubah dengan cepat sehingga perlu upaya mitigasi yang fleksibel. Evaluasi kesesuaian lahan seperti yang dikenal merupakan sebuah upaya dalam bidang pertanian yang berfungsi untuk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

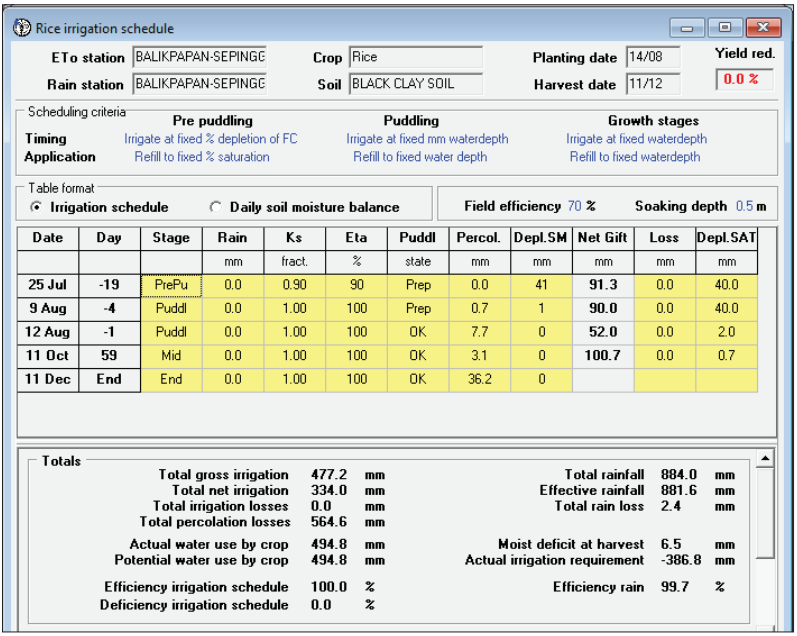
terhadap cekaman air (Ky), perhitungan hujan efektif (Pe), dan reduksi produksi (Doorenbos et al., 1980; Allen et al., 1998).

CROPWAT 8.0 sebagai *software* permodelan yang digunakan untuk menduga kebutuhan air dinilai 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.



Date	Day	Stage	Rain	Ks	Eta	Puddl	Percol.	Depl.SM	Net Gift	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			

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). C*rop 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 multidate 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.