

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 (GDPS) mengoordinasi 17 institusi yang bertanggung jawab untuk mengeluarkan dan mengembangkan informasi prediksi iklim secara global. Beberapa lembaga internasional penyedia 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 (BSISO) (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. Mode 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.

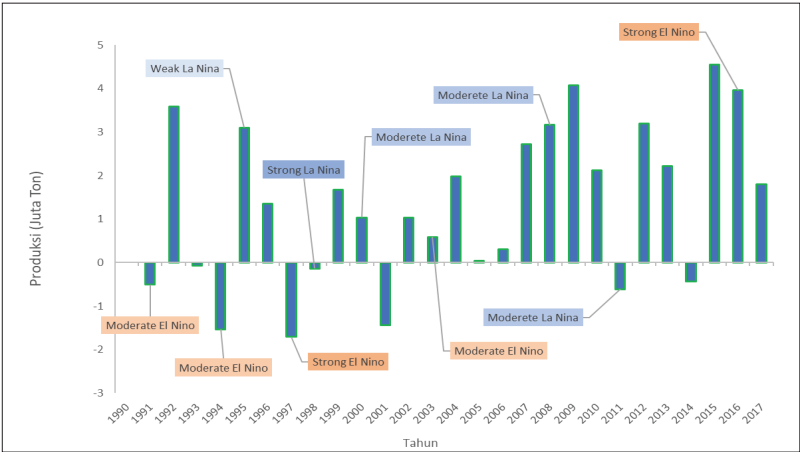
Ditengah kompleksitas dinamika atmosfer yang memengaruhi variabilitas iklim, Indonesia juga harus menghadapi perubahan iklim. Perubahan iklim merupakan kondisi berubahnya intensitas dan pola unsur-unsur iklim pada suatu wilayah dalam jangka waktu yang panjang, atau secara teknis disebutkan sebagai tren 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

untukantisipasi 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 ram-bat 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

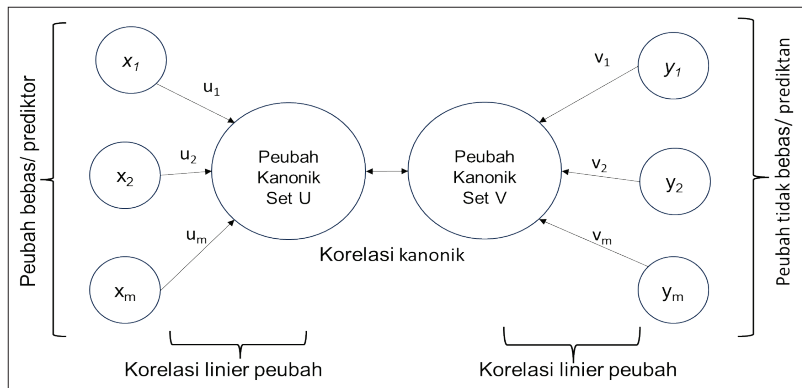
karena pada saat musim semi, ENSO berada dalam masa transisi antara fase El Niño yang lebih dingin dan fase La Niña yang lebih hangat, selama masa transisi ini, sistem iklim mengalami peralihan dari satu kondisi ke kondisi yang lain dan lemahnya hubungan antara atmosfer laut pada musim semi karena berkurangnya 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 prediktan—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)

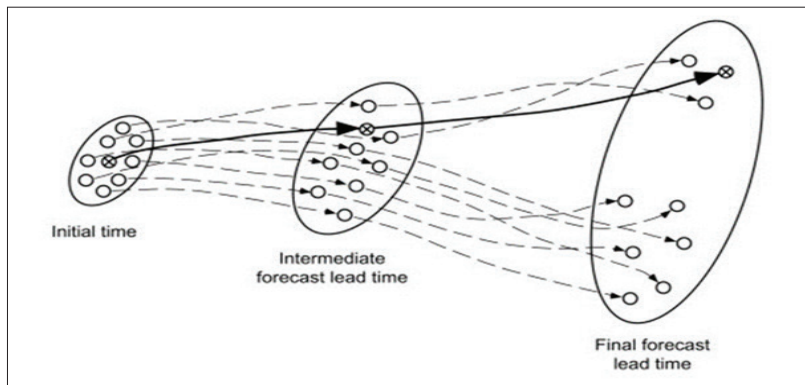
Gambar 5.2 Ilustrasi Analisis Korelasi Kanonik

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 elips, 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).

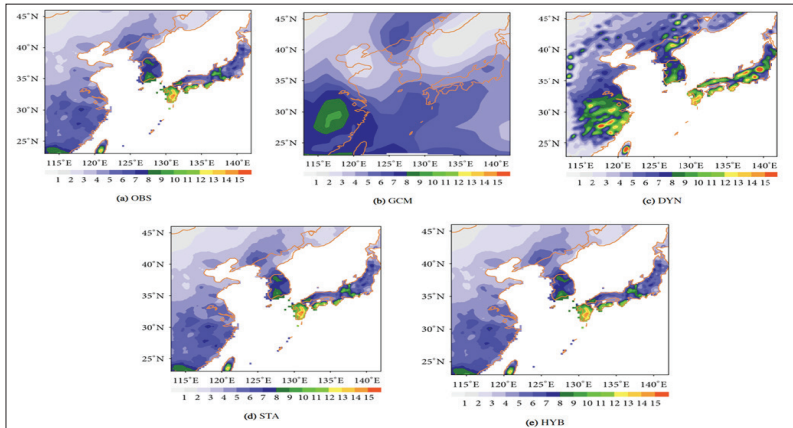
3. Downscaling Prediksi Musim

Perkembangan Prediksi iklim dunia saat ini mengandalkan Global Climate Model (GCM), yaitu program komputasi yang mensimulasikan 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*.

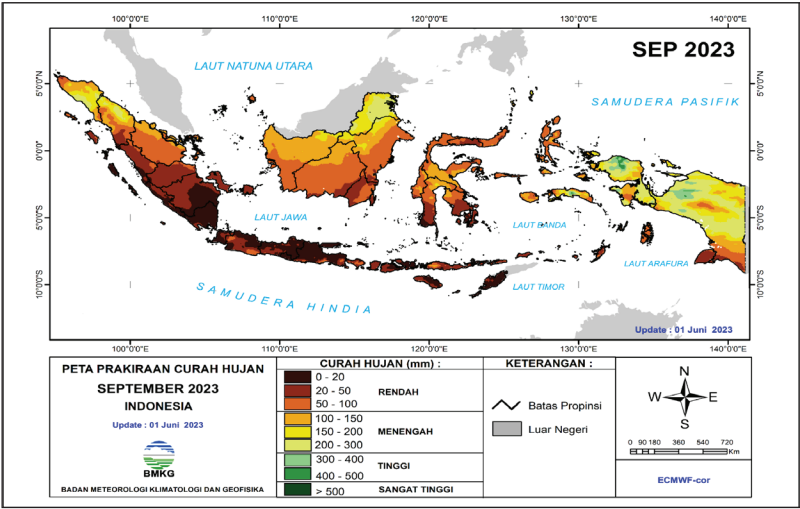
Sumber: Yhang et al. (2007)

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.

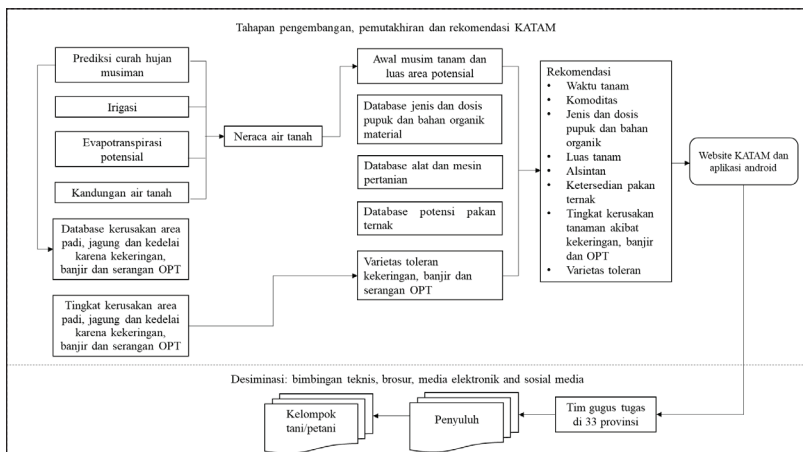
Salah satu tantangan utama dalam memprediksi iklim di Indonesia adalah keterbatasan data observasi. Stasiun cuaca dan pengukuran iklim belum tersebar merata di seluruh wilayah Indonesia yang mewakili kondisi topografi yang beragam dan daerah pedalaman. Ketersediaan data observasi yang memadai diperlukan 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).

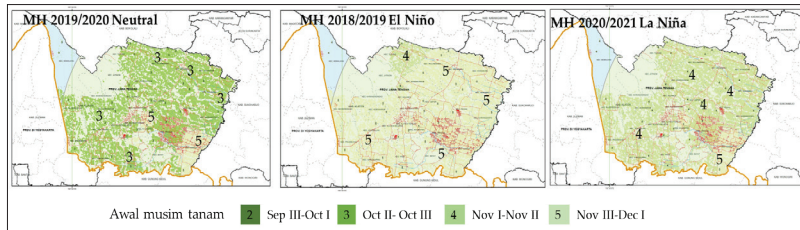
Alur pengembangan dan diseminasi sistem informasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.6. Sistem informasi ini menyediakan informasi yang terintegrasi berupa

- 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



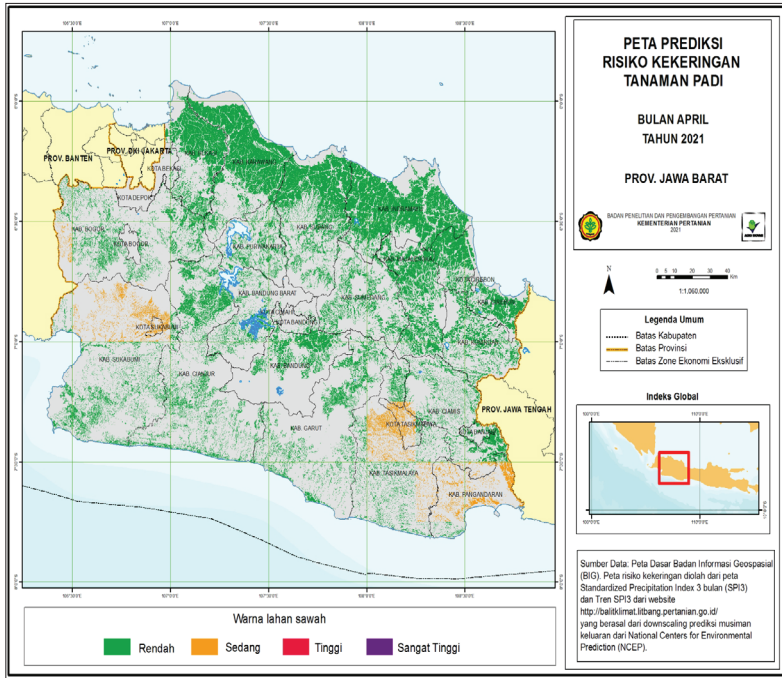
Sumber: Apriyana et al. (2021)

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 (EC-MWF) 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 berketahanan 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, Syafrianno, 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.bnpb.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). Menyelaraskan 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. Fuglestedt, 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., & Stitthichivapak, 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., Prettenhaler, 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.cliser.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.
- Kusfirdianti, 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/micomsv3i.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.org/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.org/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.org/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., Kriaučiūnienė, Z., Loit, E., Nejedlik, P., Nendel, C., Niinemets, Ü., Palosuo, T., Peltonen-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>.