

Bab XIII

Peran Sains dan Teknologi Atmosfer dalam Upaya Mewujudkan Ketahanan Pangan dan Pertanian Berkelanjutan Menghadapi Perubahan Iklim

Ibnu Fathrio, Danang Eko Nuryanto

A. Menggali Kembali Berbagai Implikasi Perubahan Iklim

Dampak perubahan iklim merupakan ancaman nyata bagi sektor pertanian. Perubahan pola dan intensitas curah hujan telah menjadi sebuah gangguan terhadap pola-pola tanam dan panen yang telah lama dijalankan oleh para petani Indonesia. Seiring dengan terjadinya pemanasan global hal ini akan melahirkan variabilitas ENSO yang lebih kuat, artinya musim kering (basah) yang identik dengan El Niño (La Niña) diprediksi akan hadir dengan intensitas lebih kuat dari sebelumnya (Cai et al., 2021). Laporan IPCC (2021) juga memprediksi kejadian cuaca ekstrem akan makin sering terjadi dan intens. Hal tersebut dapat menjadi ancaman bagi ketahanan pangan nasional di

I. Fathrio dan D. E. Nuryanto

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

© 2024 Editor & Penulis

Fathrio, I., & Nuryanto, D. E. (2024). Peran sains dan teknologi atmosfer dalam upaya mewujudkan ketahanan pangan dan pertanian berkelanjutan menghadapi perubahan iklim. Dalam D. E. Nuryanto & I. Fathrio (Ed.), *Prediksi iklim untuk ketahanan pangan* (393–405). Penerbit BRIN.

DOI: 10.55981/brin.1244.c1397. E-ISBN: 978-602-6303-49-3.

mana bencana banjir dan kekeringan dapat merusak lahan pertanian. Bertambah/berkurangnya curah hujan di suatu waktu dan tempat dari keadaan normal juga akan mengganggu fase pertumbuhan tanaman, seperti pada padi, jagung, gandum umumnya memiliki kebutuhan air yang berbeda pada tiap fase pertumbuhannya. El Niño menyebabkan penurunan curah hujan dan membuat musim kemarau datang lebih cepat dan durasi yang lebih lama. Penurunan produksi padi di NTT terjadi pada tahun 2023 yang diakibatkan oleh berkurangnya luas tanam padi dan jagung akibat kekeringan yang diakibatkan El Niño pada tahun 2023.

Banjir, kekeringan, dan pola hujan yang tidak teratur sebagai efek dari perubahan iklim telah memengaruhi sekitar 30% hasil panen di berbagai skala geografis (Lesk et al., 2016). Hal ini tentunya menimbulkan kekhawatiran besar atas ketersediaan pangan masa depan. Tidak hanya Indonesia, dari penelitian yang dilakukan Sekhar (2018) disimpulkan bahwa wilayah Asia Tenggara secara keseluruhan mengalami perubahan pola curah hujan yang berdampak negatif pada 50% hasil panen padi. Hasil penelitian Malau et al. (2021) juga menunjukkan dampak El Niño yang lebih signifikan terhadap harga pangan dibandingkan La Niña pada harga beras, ubi jalar, dan kacang hijau. Dalam laporan yang dibuat oleh FAO pun, secara tegas disebutkan bahwa meningkatnya frekuensi dan intensitas kekeringan dan banjir memiliki dampak yang menghancurkan pada ketahanan pangan dan mata pencarian di beberapa bagian dunia (FAO, 2021).

Kesadaran akan bahaya dampak-dampak perubahan iklim terhadap keberlanjutan kehidupan, terutama yang menyangkut ketahanan pangan, seluruh negara di dunia, termasuk Indonesia, mengembangkan berbagai konsep dan strategi sebagai bentuk mitigasi dan adaptasi. Penilaian kerentanan, merupakan langkah awal yang mutlak harus dilakukan untuk dapat memahami area, populasi, dan sektor mana yang paling rentan terhadap peristiwa ekstrem, seperti banjir, kekeringan, ataupun gelombang panas. Hal tersebut dilakukan dengan dukungan data, baik data historis, maupun data model iklim untuk memprediksi skenario iklim pada masa mendatang dan

dampak potensialnya. Dengan adanya informasi tingkat kerentanan, para pengambil kebijakan dapat menentukan kebutuhan infrastruktur yang harus dikembangkan untuk menahan peristiwa cuaca ekstrem, termasuk infrastruktur hijau yang merupakan gabungan solusi alama seperti lahan basah, atap hijau, ataupun hutan kota untuk mengurangi dampak perubahan iklim. Tentunya, pengembangan infrastruktur tersebut tidak lepas dari keterlibatan masyarakat serta bingkai kebijakan dan sistem regulasi. Berbagai teknologi pun dikembangkan untuk mendukung upaya-upaya mitigasi dan adaptasi dampak perubahan iklim.

Untuk beradaptasi terhadap dampak cuaca ekstrem, perubahan iklim, musim, dan fenomena antartahun seperti El Niño dan La Niña, diperlukan pemahaman lebih baik mengenai fenomena ini. Seiring dengan perkembangan teknologi di bidang sains atmosfer dan iklim, khususnya dalam bidang pengindraan jauh dan teknologi komputasi, fenomena atmosfer ini dapat diamati dan diprediksi dengan lebih baik. Teknologi pengindraan jauh dan model iklim yang makin canggih memudahkan kita untuk dapat melakukan pengamatan dan prediksi nilai suhu permukaan laut yang merupakan proxy dari status ENSO yang sedang terjadi, apakah ENSO netral atau menguat/melemah menjadi kondisi El Niño atau La Niña. Status ENSO tersebut direpresentasikan dalam bentuk indeks, antara lain indeks Nino 1+2, indeks NINO 3.4, Ocean Nino Indeks (ONI), Southern Oscillation indeks (SOI). Penelitian sebelumnya telah banyak mengaitkan korelasi kondisi El Niño dan La Niña, yang direpresentasikan dalam indeks ENSO dengan produksi tanaman pangan. Cao et al. (2023) juga menyebutkan bahwa dengan memanfaatkan sinyal awal ENSO kita dapat memprediksi sekitar seperempat dari variasi hasil panen dapat diprediksi menggunakan indeks ENSO. Boer dan Surmaini (2018) menggunakan informasi fase indeks SOI sebelum musim tanam yang dapat membantu petani untuk mengambil keputusan. Hal ini telah ditunjukkan dari meningkatnya hasil tani di daerah Kabupaten Bandung setelah menerapkan informasi dari indeks SOI tersebut.

Dalam proses menemukan langkah-langkah mitigasi dan adaptasi terhadap dampak-dampak perubahan iklim, beberapa peneliti dapat mencermati adanya sisi positif dari kejadian ENSO ataupun kejadian ekstrem lainnya yang dapat dimanfaatkan. Di beberapa wilayah, suhu yang lebih hangat dapat menyebabkan musim tanam yang lebih panjang sehingga berpotensi meningkatkan produktivitas pertanian. Selain itu, tingkat karbon dioksida yang lebih tinggi dapat meningkatkan fotosintesis, yang berarti terdapat potensi untuk dapat meningkatkan hasil panen. Beberapa tanaman mungkin menjadi lebih tahan terhadap kekeringan karena peningkatan kadar karbon dioksida tersebut. Pada Bab II telah diuraikan sisi positif dari ENSO yang dapat dimanfaatkan sebagai upaya adaptasi perubahan iklim. Penulis menunjukkan bahwa pada saat kondisi curah hujan berlebih (La Niña), terdapat peluang untuk penambahan luas area panen untuk tanaman-tanaman pangan yang membutuhkan air banyak. Jadi, meskipun produktivitas panen per luas lahan karena luas lahannya mengalami peningkatan, produksi secara keseluruhan dapat dipertahankan, atau bahkan ditingkatkan. Sebaliknya, ketika kondisi kering ekstrem yang terjadi saat El Niño, dapat terjadi juga penambahan luas lahan untuk pertanian, terutama untuk tanaman yang biasa hidup di lahan kering dan hanya bergantung pada curah hujan. Peningkatan luas panen pajale (padi, jagung, dan kedelai), ubi kayu pada masa La Niña dan pemanfaatan lahan rawa lebak di Sumatra saat El Niño yang berpotensi meningkatkan produksi beras Nasional. Hal ini juga diungkap pada penelitian Iizumi et al. (2014) yang memetakan pengaruh ENSO terhadap produksi global tanaman pangan. Dalam penelitian tersebut menunjukkan bahwa kondisi El Niño dapat membawa pengaruh positif terhadap produksi padi di sebagian daerah di Pulau Sumatra. Apriana et al. (2019) juga telah menunjukkan bagaimana pengaruh ENSO dapat menunda waktu tanam padi 4–6 dasarian di wilayah Sumatra Barat dan Jawa Barat.

Manfaat positif dari El Niño dapat diperoleh juga pada lahan pasang surut atau lebak, di mana pada saat musim kemarau dapat dilakukan penanaman pada areal yang biasanya tergenang dengan

menggunakan sistem penataan lahan pasang surut (surjan). Sistem surjan ini memiliki perspektif ekonomi, ekologi, dan budaya yang memadukan inovasi teknologi terkini dengan kearifan lokal (Susilawati & Nursyamsi, 2014).

Peningkatan produksi saat terjadi kondisi ekstrem tentunya tidak hanya dapat mengandalkan pada adanya perubahan luas lahan sebagai akibat perubahan kondisi hidrologi, tetapi perlu juga disertai dengan upaya-upaya lain yang lebih adaptif, seperti dilakukannya langkah-langkah untuk mengantisipasi penanggulangan serangan OPT, penggunaan varietas yang lebih tahan terhadap serangan OPT, pengembangan infrastruktur untuk regulasi sistem pengairan, ataupun pengembangan konsep panen dan hemat air. Tentunya, semua upaya tersebut perlu ditunjang oleh kemampuan teknologi yang adaptif.

Untuk memperoleh produktivitas optimal dari sektor pertanian diperlukan kecermatan dalam menganalisis semua tantangan dan peluang di berbagai kondisi iklim dan cuaca. Pada Bab III telah ditunjukkan suatu strategi adaptasi untuk tanaman padi dan jagung di NTT, yaitu dengan memanfaatkan informasi indeks iklim global, ENSO, dan curah hujan di NTT. Strategi adaptasi dilakukan dengan analisis prediksi potensi air hujan dalam menentukan kalender tanam. Perlu dilakukan pemilihan varietas umur pendek untuk waktu panen yang lebih cepat sehingga lebih adaptif terhadap dampak perubahan iklim. Pemahaman fase pertumbuhan jagung juga sangat penting terutama saat penentuan fase jagung yang membutuhkan lebih banyak air sehingga waktu tanam jagung dapat ditentukan dengan mempertimbangkan informasi iklim global, prediksi curah hujan, dan potensi ketersediaan air.

B. Perkembangan dan Pemanfaatan Model Iklim

Langkah adaptasi terhadap dampak perubahan iklim dan kondisi ekstrem di sektor pertanian tidak akan lepas dari kebutuhan akan informasi mengenai cuaca dan iklim. Para pengambil kebijakan sangat bergantung pada prediksi iklim dan cuaca untuk dapat menentukan langkah-langkah strategis sehingga produktivitas dapat dipertahankan

kan, bahkan ditingkatkan. Pada umumnya, sistem prediksi iklim dikembangkan dengan menggunakan model-model iklim. Bab IV dan V membahas tentang model cuaca/iklim yang merupakan simulasi komputasi terkait cuaca/iklim dapat dimanfaatkan untuk memahami dinamika atmosfer untuk cuaca, musim dan jangka panjang. Model iklim dapat digunakan untuk mempelajari kondisi atmosfer yang telah lampau, sekarang, dan yang akan datang mulai dari skala harian, musiman hingga tahunan. Seiring dengan perkembangan teknologi komputasi performa tinggi, model cuaca/iklim menjadi makin berkembang dan tidak hanya melibatkan atmosfer saja, tetapi juga memperhitungkan lautan, daratan, dan lapisan es. Model ini biasa disebut model iklim global (*global climate model*).

Institusi riset dunia banyak memanfaatkan model iklim global untuk memprediksi cuaca ekstrem, seperti siklon, tornado, seruak dingin, gelombang panas, dan sebagainya. Pada skala musiman dan tahunan, model ini digunakan untuk memprediksi awal dan akhir musim kemarau/hujan, dan prediksi ENSO untuk beberapa bulan hingga beberapa tahun ke depan. Untuk memandu model tersebut, para peneliti memanfaatkan hasil pengamatan cuaca dan iklim di darat, laut dan udara untuk diasimilasikan pada model iklim tersebut sebagai kondisi awal untuk melakukan prediksi selanjutnya. Institusi riset dunia juga mendirikan suatu kerangka kolaborasi yang bertujuan untuk menganalisis, memperbaiki, dan mengembangkan model iklim dan menambah pemahaman tentang perubahan iklim dengan membandingkan hasil simulasi dari model-model iklim yang berbeda. Kegiatan kolaborasi ini dikenal sebagai Coupled Model Intercomparison Project.

BMKG sebagai institusi resmi pemerintah yang bertugas melakukan pengamatan dan menginformasikan prediksi cuaca, musim, dan iklim memanfaatkan model dinamis baik model global dan regional dan model statistik, contohnya dalam menentukan awal musim (Tabel 6.2). Jaringan pengamatan *in situ* BMKG yang tersebar di pelosok wilayah juga menjadi alat untuk melakukan pengamatan perubahan musim dan iklim di Indonesia. Pada Bab VI telah dibahas dengan

detail bagaimana BMKG melakukan pembagian Zona Musim (ZOM) yang sampai saat ini berjumlah 699 wilayah. Pembagian ZOM ini tidak hanya melibatkan model iklim global, tetapi juga memanfaatkan seluruh stasiun pengamatan BMKG. Hal ini sangat berguna dalam penyusunan kalender tanam di mana faktor cuaca lokal suatu wilayah juga diperhitungkan. Dengan demikian, penentuan musim tidak hanya bergantung kepada model iklim global yang hanya dapat memberikan informasi kondisi atmosfer global akibat keterbatasan dari resolusi spasial yang kasar. Salah satu kontribusi BMKG dalam ketahanan pangan adalah pemanfaatan Sistem Informasi Kalender Tanam Terpadu (SI KATAM Terpadu) yang memanfaatkan prediksi hujan dari BMKG. Selain itu, data *in situ* ini juga berguna untuk memvalidasi hasil simulasi model-model iklim dan model statistik lainnya yang dilakukan institusi dunia khususnya di wilayah benua maritim Indonesia, di mana banyak model iklim memperlihatkan bias sistemik di wilayah ini.

C. Pemanfaatan Teknologi Digital dan Pengindraan Jauh

Sistem prediksi iklim tidak pernah lepas dari teknologi digital. Berbagai metode berbasis komputasi telah banyak berkembang untuk menunjang sistem prediksi iklim, di antaranya Fuzzy Time Series, Hierarchical Neural Model, Artificial Neural Network, Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA), dan sebagainya yang dengan kelemahan dan kelebihannya telah banyak digunakan untuk meramalkan curah hujan di berbagai daerah. Seasonal ARIMA (SARIMA) sebagai pengembangan dari model ARIMA dengan menggabungkan efek musiman telah digunakan untuk pendekatan dalam menentukan musim tanam dan menentukan strategi yang tepat untuk menanam pada kondisi curah hujan yang relatif rendah. Dalam Bab VII telah dibahas bahwa pemanfaatan teknologi digital ini tidak hanya untuk pertanian pada tahap prediksi iklim, tetapi juga mulai dari akuisisi data berbasis satelit, serta aplikasi-aplikasi dalam analisis ketersediaan air, pemilihan lahan, penentuan waktu tanam, yang akan men-

jadi masukan dalam manajemen pertanian. SPKL dan CROPWAT merupakan salah satu contoh aplikasi yang sering digunakan dalam manajemen pertanian. Aplikasi tersebut sangat bergantung pada data model iklim yang digunakan. Dengan demikian, validitas output SPKL dan CROPWAT akan sangat tergantung pada validitas dan akurasi data iklim yang digunakan.

Tantangan model iklim adalah ketidakpastian dalam prediksi/simulasi. Ketidakpastian ini muncul karena keterbatasan pemahaman terhadap proses-proses fisika dan dinamika yang terjadi di atmosfer. Penyederhanaan fenomena fisika atmosfer menjadi suatu persamaan empirik dapat membawa bias yang terus merambat, baik secara spasial maupun temporal. Beberapa strategi yang dapat digunakan untuk mengurangi bias yang muncul dalam prediksi iklim adalah menggunakan teknik ensembel (menjalankan model dengan konfigurasi yang berbeda), menggunakan teknik statistik (seperti dalam Bab VIII), melakukan asimilasi data dengan berbagai sumber data, baik itu data *in situ* maupun data pengindraan jauh.

Perkembangan teknologi satelit sebagai salah satu teknik pengindraan jauh telah banyak memberikan manfaat untuk digunakan pengamatan parameter iklim. Selain itu, data satelit juga banyak dimanfaatkan untuk pengembangan sistem asimilasi data prediksi iklim untuk memperoleh hasil dengan akurasi dan resolusi yang lebih baik. Misalnya, pengamatan suhu permukaan laut yang sangat penting untuk memprediksi kuat lemahnya ENSO. Misi satelit pengamatan hujan pada Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) dan Global Precipitation Measurement Mission (GPM) yang memanfaatkan inovasi radar hujan, yaitu dipasang pada satelit sejak tahun 1997 telah berhasil memberikan sumbangsih dalam pengamatan hujan di dunia dan banyak dimanfaatkan para *stakeholder* dalam sektor kebencanaan, hidrologi, dan pertanian.

Satelit TRMM yang aktif dalam kurun waktu 1997–2015 dilengkapi perangkat radar hujan dan *microwave imager*. Radar hujan dapat melihat hujan dalam bentuk kolom yang dapat digunakan untuk mendapatkan informasi berupa struktur vertikal struktur badai

tropis, sedangkan *microwave imager* bekerja dengan menangkap sinyal radiasi gelombang mikro yang dipancarkan bumi dan atmosfer sehingga kita dapat melakukan estimasi terhadap air, awan, dan intensitas hujan yang terjadi di atmosfer. Misi pengukuran hujan selanjutnya dilanjutkan GPM sejak tahun 2014 yang dilengkapi radar hujan yang lebih sensitif terhadap mendeteksi hujan ringan dan salju serta dapat memberikan informasi lebih baik terkait awan dan aerosol. BMKG telah memanfaatkan salah satu produk GPM, yaitu Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) untuk dikombinasikan dengan data curah hujan tiap stasiun pengamatan sehingga diperoleh informasi spasial hujan dengan resolusi spasial hingga ~5.5 km.

Bab IX membahas tentang teknologi satelit GNSS yang dimanfaatkan untuk mengukur profil vertikal atmosfer. GNSS merupakan sistem navigasi satelit yang digunakan untuk menentukan posisi di bumi dan sekarang banyak digunakan dalam sistem komunikasi dan transportasi. Para peneliti memanfaatkan teknik radio okultasi untuk mengestimasi profil vertikal atmosfer, yaitu kelembapan dan temperatur. Informasi ini sangat berguna sebagai modal untuk melakukan asimilasi untuk setiap level grid ketinggian pada model cuaca dan iklim. Perlu diketahui bahwa informasi profil vertikal atmosfer sangatlah terbatas. Radiosonde dapat memberikan profil vertikal atmosfer, tetapi umumnya hanya diluncurkan di atas daratan dan tersedia di jam tertentu saja dengan biaya peluncuran relatif mahal. Hasil penelitian Ha et al. (2014) menunjukkan hasil menjanjikan dengan mengasimilasikan data profil vertikal refraktivitas GPS-RO ke dalam model cuaca untuk kasus prediksi hujan lebat. Wilhelmsen et al. (2018) juga telah mengembang indeks Quasi Biennial Oscillation dan ENSO index yang diturunkan dari pengamatan GPS-RO selama 15 tahun. Indeks ini memiliki kelebihan daripada indeks ENSO yang biasa digunakan karena indeks ini diturunkan dari nilai refraksi atmosfer sehingga meniadakan potensi keterlambatan/jeda respons suatu variabilitas atmosfer. Dapat dikatakan indeks ini mengukur variabilitas atmosfer di waktu yang sama. Hal ini berbeda dengan indeks ENSO yang diturunkan dari nilai suhu permukaan laut membuat

kita perlu memperhitungkan adanya potensi jeda waktu respons/keterlambatan. Selain itu, indeks ENSO dari GPS-RO ini juga telah memperhitungkan variabilitas atmosfer di setiap ketinggian, tidak hanya di satu level ketinggian saja seperti suhu permukaan laut.

Bab X memberikan sebuah solusi dalam bentuk aplikasi peringatan dini yang digagas institusi pemerintah di Indonesia, yaitu Badan Meteorologi dan Geofisika (BMKG), BRIN, BIG, Kementan, dan bekerja sama dengan para periset Ilmu Tanah, Agroklimatologi dan Hidrologi untuk menjaga produksi tanaman hortikultura dari ancaman banjir, kekeringan, dan serangan OPT. Aplikasi ini dinamakan Early Warning System (EWS) Perlindungan Hortikultura dan Pengelolaan Tanam Komoditas Strategis (SIPANTARA). Aplikasi ini dibangun dengan memanfaatkan data iklim, data banjir dan kekeringan, serta data OPT dominan. Aplikasi ini mengadopsi penggunaan geospatial *artificial intelligence* yang memprediksi banjir dan kekeringan hingga skala kecamatan berdasarkan hasil *training* pola curah hujan di Indonesia selama 10 tahun terakhir. Keunggulan EWS ini memberikan informasi prediksi iklim dan ancaman banjir dan kekeringan untuk 3–5 bulan ke depan, informasi jadwal tanam potensial dan informasi OPT yang dominan sebagai upaya adaptasi dan mitigasi.

D. Menuju Pertanian Berkelanjutan

Bertambahnya kebutuhan pangan seiring pertambahan penduduk menuntut kita untuk dapat menyediakan dan menjaga keberlangsungan produksi pangan. Perubahan iklim yang terjadi dapat membawa dampak negatif menjadi tantangan kita untuk mempertahankan produksi pangan. Salah satu upaya penting untuk beradaptasi dan melakukan mitigasi adalah dengan menerapkan konsep pertanian cerdas iklim, seperti yang telah dibahas pada Bab XI. Pertanian cerdas iklim merupakan suatu pendekatan integratif untuk mencapai ketahanan pangan dalam tantangan perubahan iklim. Beberapa upaya yang dapat dilakukan, yaitu dengan membangun infrastruktur pertanian dan sistem irigasi yang baik, diversifikasi tanaman, pengolahan tanah/lahan yang berkelanjutan dengan penerapan *conservation*

agriculture, membangun suatu sistem peringatan dini cuaca ekstrem untuk pertanian dari bencana hidrometeorologi dan serangan OPT, pendidikan dan peningkatan kesadaran petani dalam penerapan CSA, serta pengurangan resiko bencana dan penelitian dan inovasi. CSA juga bertujuan untuk menciptakan pertanian yang menghasilkan emisi gas rumah kaca yang rendah. Hal ini dapat diwujudkan dengan mengurangi pengolahan tanah, penerapan *precision farming*, penerapan wanatani, pengelolaan ternak, penggunaan energi terbarukan dan penggunaan lahan yang berkelanjutan seperti penerapan rotasi tanaman. Bab XII menjelaskan salah satu penerapan CSA yang dapat mengurangi emisi gas metan dari aktivitas pertanian, yaitu dengan menggiatkan pertanian aerobik yang membutuhkan air lebih sedikit dengan irigasi berselang. Penerapan pertanian aerobik ini dapat memelihara kondisi tanah aerobik yang kaya oksigen di seluruh siklus penanaman padi dan dapat mengurangi degradasi tanah. Hasil penerapan pertanian aerobik di Indonesia, Amerika Serikat, Australia, Tiongkok, dan Bangladesh telah mencatat berkurangnya emisi metana hingga 50 persen. Salah satu tantangan untuk menerapkan lingkungan aerobik yang optimal untuk tanaman ini adalah curah hujan di wilayah Indonesia yang berbeda. Hal ini menuntut manajemen irigasi yang tepat untuk menciptakan kondisi aerobik yang dapat diwujudkan dengan menerapkan CSA seperti pengamatan cuaca *real time* dan menerapkan irigasi presisi.

Buku ini telah mengungkapkan berbagai peran kemajuan sains dan teknologi di bidang atmosfer dalam upaya untuk menciptakan ketahanan pangan di tengah tantangan kondisi perubahan iklim. Pemahaman dan pemanfaatan indeks iklim global, kemajuan model iklim, peran satelit meteorologi telah dimanfaatkan pemerintah, swasta, dan lembaga riset untuk mengkaji dan memprediksi cuaca dan iklim. Peran BMKG sebagai lembaga meteorologi resmi di Indonesia menjadi sangat penting dalam melakukan pengamatan secara kontinu, mengumpulkan dan menyampaikan informasi cuaca dan iklim ke masyarakat dan pemangku kepentingan. Hasil riset dan inovasi di bidang sains atmosfer dan teknologi juga telah dimanfaatkan untuk

pengembangan sistem peringatan dini/pengambil keputusan yang dapat dimanfaatkan langsung oleh petani. Dalam pelaksanaannya dan menjaga keberlangsungan upaya mewujudkan ketahanan pangan selalu diperlukan kolaborasi berbagai pihak, konsistensi, dan pendampingan lapangan untuk para petani. Ketersediaan pangan akan menciptakan stabilitas ekonomi, kemandirian pangan, dan meningkatnya kesejahteraan sosial.

Referensi

- Apriyana, Y., Aldrian, E., & Koesmaryono, Y. (2019, November). The dynamics of rice cropping calendar and its relation with the ENSO (El Niño-Southern Oscillation) and IOD (Indian Ocean Dipole) in Monsoon and Equatorial Regions of Indonesia. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 363, No. 1, Artikel 012013). IOP Publishing.
- Boer, R., & Surmaini, E. (2020). Economic benefits of ENSO information in crop management decisions: case study of rice farming in West Java, Indonesia. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(4), 1435–1446. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03055-9>
- Cai, W., Santoso, A., Collins, M., Dewitte, B., Karamperidou, C., Kug, J.-S., Lengaigne, M., McPhaden, M. J., Stuecker, M. F., Taschetto, A. S., Timmermann, A., Wu, L., Yeh, S.-W., Wang, G., Ng, B., Jia, F., Yang, Y., Ying, J., Zheng, X.-T., Bayr, T. ... Zhong, W. (2021). Changing El Niño–Southern oscillation in a warming climate. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(9), 628–644.
- Cao, J., Zhang, Z., Tao, F., Chen, Y., Luo, X., & Xie, J. (2023). Forecasting global crop yields based on El Niño Southern Oscillation early signals. *Agricultural Systems*, 205, 103564.
- Change, I. C. (2013). The Physical Science Basis.
- Iizumi, T., Luo, J. J., Challinor, A. J., Sakurai, G., Yokozawa, M., Sakuma, H., Brown, M. E., & Yamagata, T. (2014). Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. *Nature communications*, 5(1), 3712.
- Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529, 84–87 <https://doi.org/10.1038/nature16467>.

- Malau, L. R. E., Ulya, N. A., Anjani, R., & Rahmat, M. (2021, October). Study of ENSO impact on agricultural food crops price as basic knowledge to improve community resilience in climate change. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 874, No. 1, Artikel 012008). IOP Publishing.
- FAO. (2021). *The impact of disasters and crises on agriculture and food security: 2021*. <https://doi.org/10.4060/cb3673en>
- Sekhar, C. S. C. (2018). Climate change and rice economy in Asia: Implications for trade policy. Dalam *The state of agricultural commodity markets* (SOCO) (Vol. 2018). FAO.
- Wilhelmsen, H., Ladstädter, F., Scherllin-Pirscher, B., & Steiner, A. K. (2018). Atmospheric QBO and ENSO indices with high vertical resolution from GNSS radio occultation temperature measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(3), 1333–1346.