

Bab IV

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

Prawira Yudha Kombara, Amalia Nurlatifah,
Aulia Arip Rakhman

A. Tantangan Iklim dalam Peningkatan Ketahanan Pangan

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

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

© 2024 Editor & Penulis

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

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

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

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

B. Iklim dan Komponennya

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

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

1. Atmosfer

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

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

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

2. Hidrosfer

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

3. Kriosfer

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

4. Permukaan Daratan

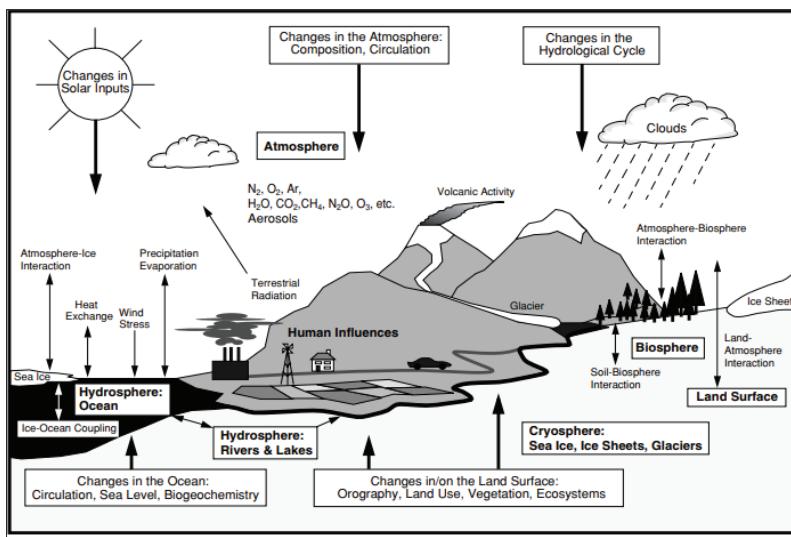
Permukaan daratan merupakan tempat di mana sebagian besar makhluk hidup tinggal, seperti hewan, tanaman, dan juga manusia. Selain berperan sebagai tempat tinggal sebagian besar makhluk hidup, permukaan daratan juga menentukan pola iklim di suatu tempat. Permukaan daratan yang berupa dataran tinggi akan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

5. Biosfer

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

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

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



Sumber: Baede et al. (2007)

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

C. Sejarah Model Iklim

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

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

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

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

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

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

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

1. Manabe dan Program Pemodelan Sirkulasi Global GFDL

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

Beberapa Model Sirkulasi Global yang dikembangkan GFDL, antara lain,

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

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

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

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

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

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

3. The National Centre of Atmospheric Research (NCAR)

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

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

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

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

D. Prinsip Dasar

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

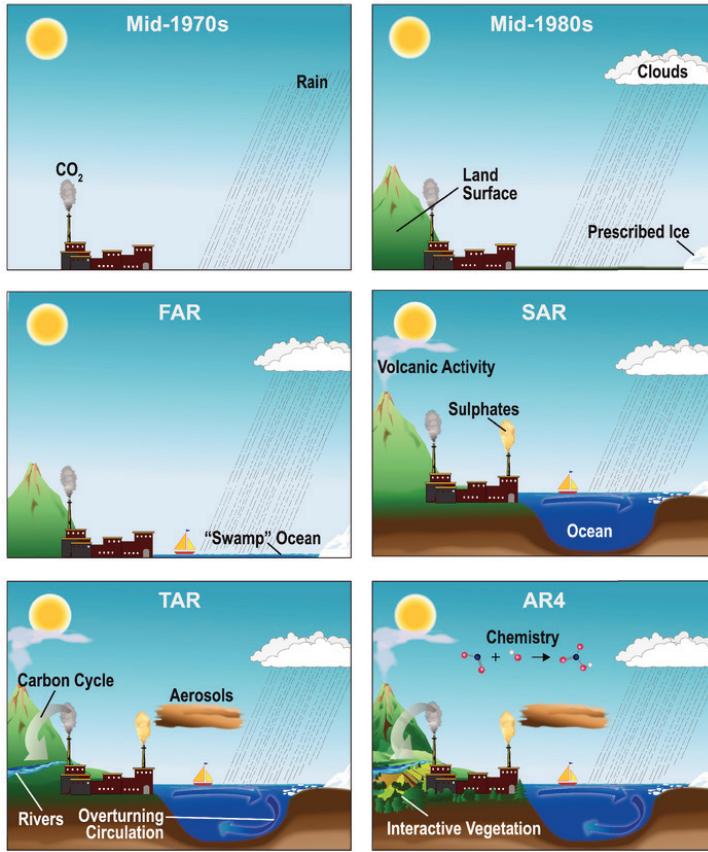
Untuk dapat menjelaskan dinamika hubungan suhu dan tekanan uap air maksimum dalam atmosfer, digunakan persamaan Clausius-Clapeyron, sedangkan untuk menjelaskan kecepatan, tekanan, suhu, dan kepadatan gas di atmosfer dan air di lautan, digunakan persamaan gerak fluida Navier-Stokes yang dimodifikasi dan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

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

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

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

The World in Global Climate Models



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

Sumber: IPCC AR4 (2014)

Gambar 4.2 Ilustrasi Proses yang Ditambahkan Ke Model Iklim Global

E. Inovasi Pemodelan

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

1. Coupled Atmosphere-Ocean Models

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

2. Spectral Transform Techniques

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

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

F. Riset di Bidang Karbon Dioksida dan Iklim

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

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

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

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

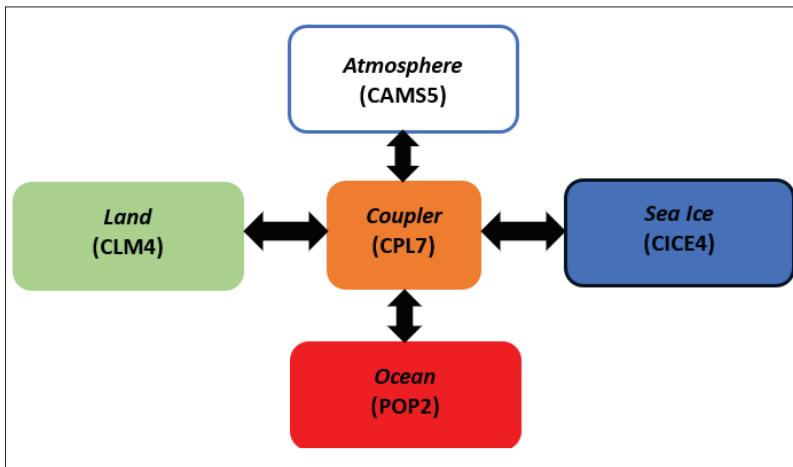
Model iklim *couple* sebenarnya merupakan model yang sangat kompleks dan rumit. Seperti yang disebutkan sebelumnya, komponen model iklim *couple* terdiri dari beberapa model. Selain itu, karena memiliki banyak komponen, tentunya ketika dijalankan model ini membutuhkan sumber daya komputasi yang tidak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

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

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

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

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



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

Gambar 4.3 Komponen Model Iklim CEMS

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

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



Sumber: Copernicus (2023)

Gambar 4.4 Tampilan Depan Laman Climate Change Service

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

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

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

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

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

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

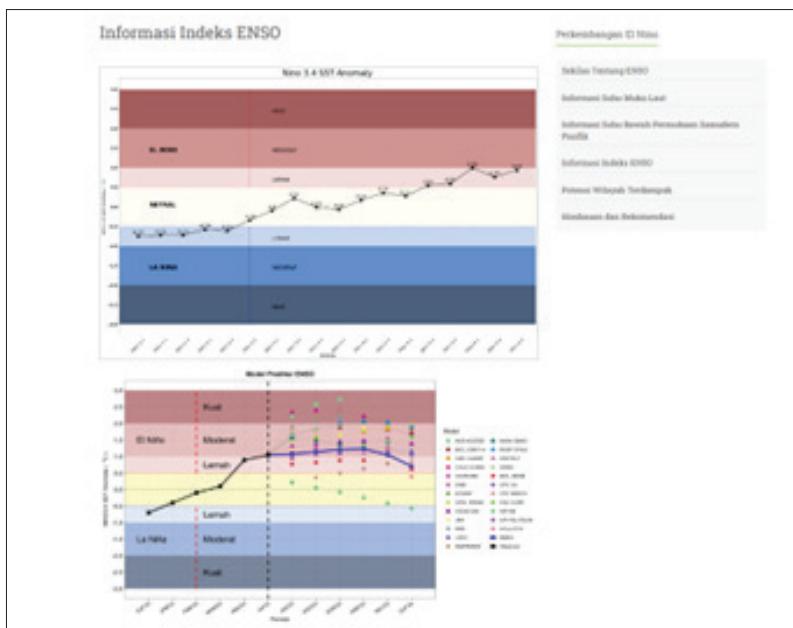
I. Ketidakpastian dalam Model Prediksi Iklim

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

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

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

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



Sumber: BMKG (2023)

Gambar 4.5 Informasi Prediksi Indeks ENSO pada Laman BMKG

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

J. Prediksi Iklim di Indonesia

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

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

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

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

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

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

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

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

K. Peran Model dalam Prediksi Kondisi Iklim Global

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

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

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

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

L. Penutup

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

Referensi

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

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

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

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

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