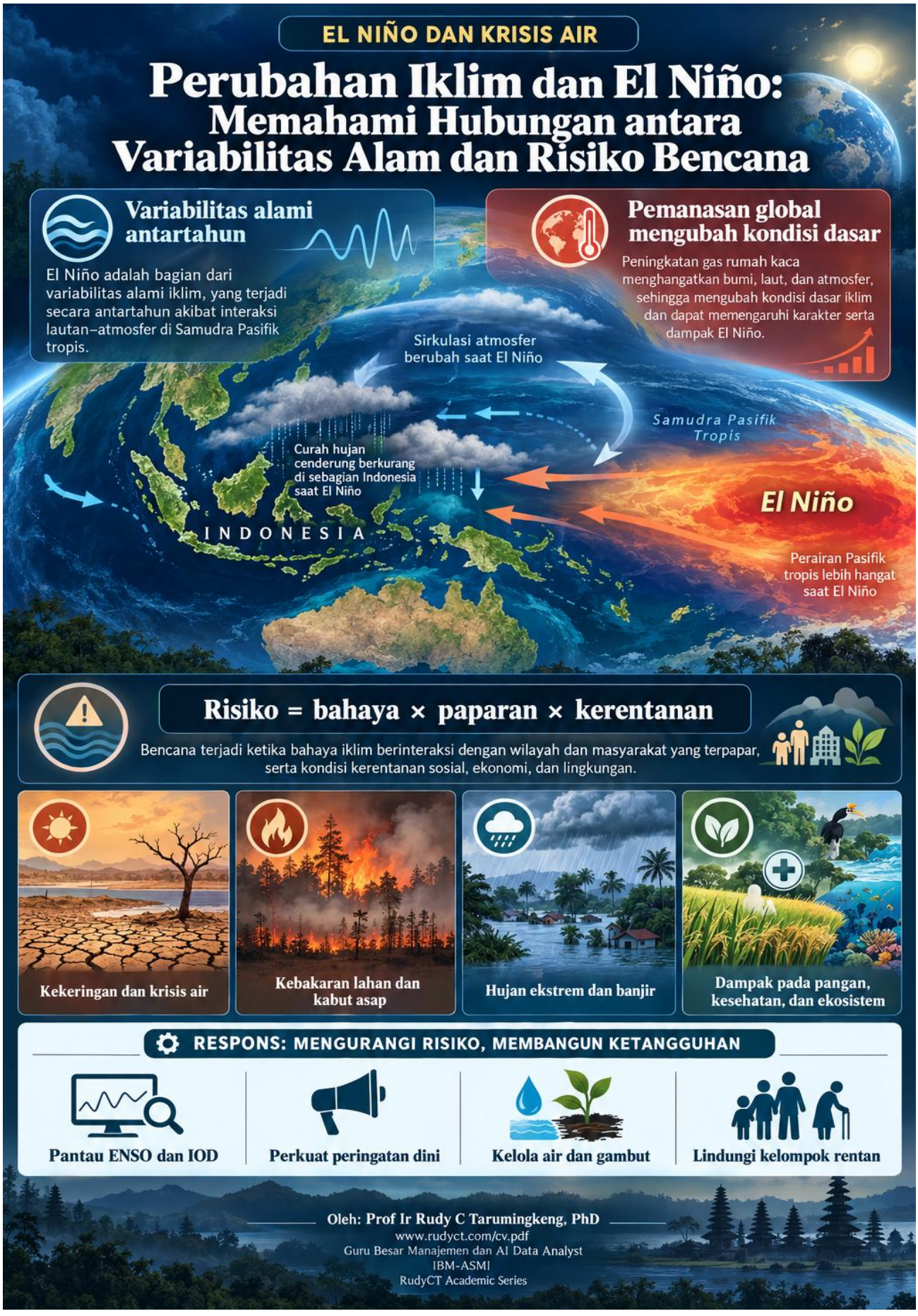
EL NIÑO DAN KRISIS AIR
Perubahan Iklim dan El Niño: Memahami Hubungan antara Variabilitas Alam dan Risiko Bencana
Variabilitas alami antartahun
El Niño adalah bagian dari variabilitas alami iklim, yang terjadi secara antartahun akibat interaksi lautan–atmosfer di Samudra Pasifik tropis.
Pemanasan global mengubah kondisi dasar
Peningkatan gas rumah kaca menghangatkan bumi, laut, dan atmosfer, sehingga mengubah kondisi dasar iklim dan dapat memengaruhi karakter serta dampak El Niño.
Sirkulasi atmosfer berubah saat El Niño
Samudra Pasifik Tropis
Curah hujan cenderung berkurang di sebagian Indonesia saat El Niño
INDONESIA
El Niño
Perairan Pasifik tropis lebih hangat saat El Niño
Risiko = bahaya × paparan × kerentanan
Bencana terjadi ketika bahaya iklim berinteraksi dengan wilayah dan masyarakat yang terpapar, serta kondisi kerentanan sosial, ekonomi, dan lingkungan.
Kekeringan dan krisis air
Kebakaran lahan dan kabut asap
Hujan ekstrem dan banjir
Dampak pada pangan, kesehatan, dan ekosistem
RESPONS: MENGURANGI RISIKO, MEMBANGUN KETANGGUHAN
Pantau ENSO dan IOD
Perkuat peringatan dini
Kelola air dan gambut
Lindungi kelompok rentan
Oleh: Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD
www.rudyct.com/cv.pdf
Guru Besar Manajemen dan AI Data Analyst
IBM-ASMI
RudyCT Academic Series

# Perubahan Iklim dan El Niño: Memahami Hubungan antara Variabilitas Alam dan Risiko Bencana

**Oleh: Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD**

www.rudyct.com/cv.pdf

***IBM-ASMI*** **RudyCT Academic Series**

## Abstrak

*Artikel ini menjelaskan bagaimana El Niño, sebagai fase hangat El Niño–Southern Oscillation (ENSO), berinteraksi dengan perubahan iklim antropogenik dalam membentuk bahaya dan risiko bencana. El Niño adalah variabilitas alami antartahun yang timbul dari kopling laut–atmosfer di Pasifik tropis; perubahan iklim adalah pergeseran jangka panjang yang terutama didorong oleh peningkatan gas rumah kaca. Keduanya bukan penjelasan yang saling meniadakan. Pemanasan global mengubah kondisi dasar tempat ENSO bekerja: suhu awal lebih tinggi, atmosfer yang lebih mampu menampung uap air, permintaan evaporatif yang meningkat, muka laut yang naik, dan paparan sosial-ekologis yang berubah. Bukti kuat menunjukkan pemanasan telah meningkatkan ekstrem panas dan hujan lebat di banyak wilayah. Namun, arah perubahan amplitudo suhu permukaan laut ENSO dan sejumlah telekoneksi regional masih memiliki ketidakpastian; karena itu, klaim bahwa setiap El Niño menjadi lebih sering atau lebih kuat akibat perubahan iklim harus dinyatakan secara hati-hati. Proyeksi lebih konsisten menunjukkan peningkatan variabilitas hujan terkait ENSO di dunia yang lebih hangat, meskipun amplitudo ENSO berdasarkan suhu permukaan laut belum menunjukkan konsensus model yang*

*kokoh. Fokus Indonesia dibahas melalui interaksi ENSO dengan Indian Ocean Dipole, monsun, kondisi lokal, tata guna lahan, gambut, pertanian, kesehatan, air, energi, dan tata kelola risiko. Kerangka bahaya–paparan–kerentanan digunakan untuk menunjukkan bahwa El Niño tidak otomatis menjadi bencana: kerugian muncul ketika anomali iklim berjumpa dengan penduduk dan aset yang terpapar serta kapasitas adaptasi yang terbatas. Artikel menyimpulkan bahwa prakiraan musiman, peringatan dini berbasis dampak, perlindungan sosial, pengelolaan air dan lahan, pengurangan emisi, serta pembelajaran kelembagaan perlu diintegrasikan. Dengan cara itu, variabilitas alami dapat dikelola sebagai informasi untuk bertindak, sementara perubahan iklim ditangani sebagai tekanan struktural jangka panjang.*

**Kata Kunci:** perubahan iklim; El Niño; ENSO; risiko bencana; kekeringan; banjir; Indonesia; adaptasi; peringatan dini

## 1 Pendahuluan dan dua proses iklim dalam satu dunia yang menghangat

El Niño kerap muncul dalam pemberitaan ketika musim kemarau memanjang, waduk menyusut, kebakaran lahan meluas, atau harga pangan meningkat. Pada saat yang sama, masyarakat mendengar bahwa perubahan iklim membuat cuaca makin ekstrem. Dua istilah ini sering ditempatkan seolah-olah saling menggantikan: jika kekeringan disebut akibat El Niño, perubahan iklim dianggap tidak relevan; jika perubahan iklim disebut penyebabnya, variabilitas alam seakan diabaikan. Pemisahan seperti itu tidak sesuai dengan ilmu iklim. Peristiwa tertentu berkembang melalui beberapa skala proses yang bekerja serentak. ENSO mengatur variasi antartahun, sedangkan pemanasan antropogenik menggeser keadaan latar, dan keputusan manusia menentukan siapa atau apa yang mengalami kerugian.

Perbedaan skala waktu membantu memperjelas persoalan. Cuaca menggambarkan keadaan atmosfer dalam hitungan jam hingga hari; iklim merangkum statistik cuaca selama periode panjang, lazimnya tiga dekade

untuk normal klimatologis. Variabilitas iklim adalah fluktuasi di sekitar keadaan rata-rata, baik yang timbul secara internal dalam sistem bumi maupun dari pengaruh eksternal. Perubahan iklim adalah perubahan pada rerata atau distribusi statistik yang berlangsung lintas dekade atau lebih. Variabilitas tidak berhenti ketika iklim berubah. Sebaliknya, variasi musiman dan antartahun terus terjadi di atas latar yang perlahan bergeser.

Pertanyaan utama artikel ini bukan apakah El Niño atau perubahan iklim "menyebabkan" suatu bencana secara tunggal. Pertanyaan yang lebih berguna ialah: proses fisik apa yang membentuk bahaya; bagaimana pemanasan global mengubah peluang dan intensitasnya; bagaimana paparan serta kerentanan menentukan dampak; dan keputusan apa yang dapat mengurangi kerugian. Kerangka ini mencegah dua kekeliruan. Pertama, menganggap El Niño sebagai bencana dengan sendirinya, padahal ia merupakan pola iklim. Kedua, menganggap semua kejadian ekstrem lokal dapat langsung diatribusikan kepada perubahan iklim tanpa analisis yang sesuai.

Bukti ilmiah yang digunakan di sini mencakup penilaian IPCC, laporan WMO, telaah ilmiah tentang ENSO dan risiko bencana, serta penelitian Indonesia mengenai hujan, kekeringan, kebakaran, dan pertanian. Penekanan diberikan pada temuan yang kuat dan batas pengetahuan yang masih terbuka. Untuk kebijakan, batas tersebut bukan alasan untuk menunggu. Justru karena iklim bervariasi dan ketidakpastian regional tetap ada, strategi yang tangguh perlu berfungsi di berbagai kemungkinan keadaan iklim.

Secara konseptual, kejadian ekstrem dapat dipahami sebagai hasil dari distribusi probabilitas yang bergeser, bukan sebagai kejadian yang dahulu mustahil lalu tiba-tiba muncul. Distribusi suhu, hujan, atau debit memiliki rentang dan ekor. Pemanasan dapat menggeser rerata, memperlebar variabilitas, atau mengubah bentuk ekor; ketiganya menghasilkan konsekuensi yang berbeda. ENSO dapat mengubah posisi suatu musim dalam distribusi antartahun, sementara pemanasan mengubah distribusi itu sendiri. Dengan

membedakan keduanya, pembaca dapat memahami mengapa satu tahun kering tidak membuktikan tren iklim, tetapi tren iklim juga tidak dapat diabaikan hanya karena satu musim kering memiliki pemicu alami. Penilaian yang tepat menggabungkan catatan pengamatan, mekanisme fisik, dan pembanding statistik.

Pembedaan skala waktu juga membantu menghindari salah tafsir terhadap anomali satu tahun. Bila satu tahun mencatat suhu sangat tinggi bersamaan dengan El Niño, catatan tersebut tidak dengan sendirinya mengukur laju perubahan iklim. Sebaliknya, bila tahun berikutnya lebih sejuk, itu tidak membatalkan tren jangka panjang. Penilaian tren memerlukan seri waktu yang cukup panjang, koreksi terhadap perubahan alat ukur dan cakupan pengamatan, serta pembanding yang konsisten. Untuk masyarakat, prinsip ini dapat disampaikan dengan sederhana: variasi menjelaskan mengapa satu tahun berbeda dari tahun sebelumnya; perubahan iklim menjelaskan bagaimana peluang dan tingkat dasar berubah selama puluhan tahun. Kedua penjelasan dapat hadir pada tahun yang sama.

## 2 El Niño dan ENSO sebagai mesin laut–atmosfer di Pasifik tropis

El Niño adalah fase hangat dari El Niño–Southern Oscillation, suatu mode variasi iklim yang melibatkan interaksi laut dan atmosfer tropis Pasifik. Fase dinginnya disebut La Niña, sedangkan kondisi yang tidak memenuhi ambang fase hangat atau dingin disebut ENSO-netral. ENSO bukan sekadar perubahan suhu permukaan laut. Ia mencakup perubahan suhu laut, tekanan udara, angin pasat, kedalaman termoklin, pola konveksi, dan sirkulasi atmosfer. Keterpaduan unsur tersebut membuat ENSO mampu memengaruhi cuaca jauh dari Pasifik melalui telekoneksi (NOAA Climate Prediction Center, n.d.).

Dalam keadaan rata-rata, angin pasat bertiup dari timur ke barat di sepanjang ekuator Pasifik. Angin ini mendorong air permukaan hangat ke arah barat, menumpuknya di sekitar Indonesia dan Pasifik barat, sementara di Pasifik timur

terjadi pengangkatan air yang relatif lebih dingin. Gradien suhu timur–barat tersebut membantu mempertahankan sirkulasi Walker: udara naik di wilayah barat yang hangat dan lembap, mengalir ke timur pada lapisan atas, lalu turun di Pasifik tengah dan timur. Ketika angin pasat melemah, air hangat bergerak ke timur, pengangkatan air dingin melemah, dan pusat konveksi tropis bergeser. Perubahan itu kemudian memengaruhi tekanan udara dan angin dalam pola yang dapat memperkuat anomali awal. Kopling dan umpan balik ini menjadi bagian penting dari dinamika ENSO.

El Niño biasanya diidentifikasi melalui anomali suhu permukaan laut di wilayah Niño 3.4, namun operasionalitasnya juga mempertimbangkan indikator atmosfer dan durasi. Organisasi dan pusat prakiraan dapat memakai definisi indeks serta ambang yang sedikit berbeda. Oleh sebab itu, suatu pernyataan bahwa "El Niño telah dimulai" sebaiknya merujuk pada lembaga, indeks, dan periode yang digunakan. Untuk pengguna kebijakan, indeks laut saja tidak cukup. Yang diperlukan ialah prakiraan dampak wilayah: peluang hujan di bawah normal, perubahan awal musim, tekanan terhadap debit sungai, atau kemungkinan peningkatan kebakaran.

El Niño juga tidak seragam. Lokasi pemanasan maksimum dapat berbeda antara tipe Pasifik timur dan Pasifik tengah; intensitas, lama kejadian, musim puncak, serta hubungan dengan kondisi laut di sekitarnya pun beragam. Penelitian tentang kebakaran Indonesia menunjukkan tipe El Niño dan fase IOD dapat membedakan intensitas serta lamanya musim kebakaran (Pan et al., 2018). Karena itu, menyamakan seluruh kejadian El Niño dengan satu pola dampak akan menghasilkan gambaran yang terlalu sederhana.

ENSO berlangsung sebagai siklus yang tidak memiliki jadwal tetap. Fase-fasenya dapat bertahan beberapa musim hingga sekitar satu atau dua tahun, tetapi jarak antarkejadian dan intensitasnya berubah-ubah. Model prakiraan memanfaatkan pengamatan laut dan atmosfer serta simulasi sistem bumi. Keterampilan prakiraan biasanya bergantung pada waktu dalam setahun dan

waktu ke depan; ada pula “barrier musim semi” ketika ketidakpastian prakiraan cenderung meningkat. Informasi probabilistik lebih tepat daripada ramalan deterministik: misalnya, peluang hujan di bawah normal meningkat, bukan kepastian bahwa hujan tidak akan turun.

Kopling laut dan atmosfer berlangsung melalui pertukaran panas, uap air, dan momentum. Angin pasat mendorong air permukaan dan memengaruhi kemiringan termoklin, yaitu batas antara lapisan air hangat di permukaan dan air yang lebih dingin di bawahnya. Perubahan suhu permukaan kemudian memengaruhi tekanan dan konveksi, yang kembali mengubah angin. Umpan balik Bjerknes sering digunakan untuk menjelaskan penguatan anomali ENSO: gradien suhu laut yang melemah, angin pasat yang berubah, dan pergeseran konveksi saling menguatkan dalam fase tertentu. Namun, fase awal dan akhir kejadian juga melibatkan proses yang lebih kompleks, termasuk gelombang laut, perubahan kandungan panas, dan interaksi di luar ekuator. Mekanisme ini menjelaskan mengapa prakiraan membutuhkan pengamatan samudra dan atmosfer secara bersama.

Pemantauan ENSO menggabungkan beberapa indeks. Niño 3.4 merangkum anomali suhu permukaan laut pada bagian tengah Pasifik ekuatorial; Southern Oscillation Index merangkum perbedaan tekanan atmosfer antara kawasan Pasifik barat dan timur; indeks angin dan konveksi memberi gambaran respons atmosfer. Pemilihan indeks dapat mengubah tanggal awal atau akhir suatu episode. Oleh karena itu, pernyataan teknis harus menyebut sumber dan definisi operasional yang digunakan. Bagi pengguna awam, perbedaan definisi tidak perlu membingungkan apabila lembaga menyertakan arti praktisnya, seperti perubahan peluang hujan pada bulan tertentu. Praktik ini meningkatkan keterbandingan informasi antarlembaga dan membantu menghindari klaim yang terlalu tegas dari satu indikator.

## 3 Telekoneksi dan pengaruh anomali Pasifik di wilayah jauh

Pergeseran konveksi di Pasifik tropis mengubah pemanasan atmosfer dan menghasilkan gelombang sirkulasi yang merambat ke wilayah lain. Mekanisme tersebut dikenal sebagai telekoneksi. Dampaknya bukan berupa salinan sederhana satu banding satu; ia bergantung pada musim, posisi pusat anomali, kondisi samudra dan atmosfer lain, serta topografi. Di suatu kawasan, El Niño dapat meningkatkan peluang kekeringan; di kawasan lain, ia dapat mengubah peluang hujan ekstrem. Bahkan dalam satu negara, sinyalnya dapat berbeda antarpulau atau antarmusim.

Indonesia berada di antara Pasifik dan Samudra Hindia, dekat pusat sirkulasi konvektif tropis dan wilayah maritim dengan topografi kompleks. Pada banyak bagian Indonesia, terutama wilayah selatan dan barat, El Niño berasosiasi dengan berkurangnya hujan pada musim kemarau atau tertundanya awal musim hujan. Akan tetapi, responsnya tidak seragam di seluruh kepulauan. Pola hujan lokal dipengaruhi angin monsun, siklus harian darat–laut, relief pegunungan, garis pantai, dan gangguan cuaca regional. Hasil penelitian mengenai Jawa menunjukkan bahwa kekeringan meteorologis di sejumlah sentra padi dimodulasi oleh El Niño dan IOD positif, tetapi intensitas dampak berbeda menurut lokasi dan sumber data (Siswanto et al., 2022).

Indian Ocean Dipole (IOD) adalah variasi gradien suhu permukaan laut di Samudra Hindia tropis. Dalam fase positif, perairan di bagian barat Samudra Hindia cenderung lebih hangat dibanding bagian timur dekat Indonesia. Keadaan ini dapat menggeser konveksi dan memperkuat kondisi kering di sebagian Indonesia. Bila El Niño dan IOD positif hadir bersamaan, pengaruh terhadap hujan dan risiko kebakaran dapat bertambah; namun interaksi tersebut tidak selalu sederhana atau identik. Pan et al. (2018) menemukan bahwa kebakaran lebih intens dan berkepanjangan pada beberapa kombinasi tipe El Niño dan fase IOD. Temuan itu mendorong pemantauan bersama ENSO dan IOD, bukan penggunaan satu indeks sebagai penentu tunggal.

Variasi monsun menambah lapisan dinamika. Angin monsun menentukan musim basah dan kering, tetapi awal, lama, serta kekuatannya berubah antartahun. ENSO dan IOD dapat memodulasi monsun, sedangkan kondisi lokal memengaruhi distribusi hujan. Karena itu, prakiraan iklim untuk Indonesia perlu menjelaskan wilayah dan rentang waktu, misalnya "peluang awal musim hujan mundur di zona musim tertentu," bukan "Indonesia akan mengalami kekeringan." Pernyataan nasional yang terlalu menyeluruh dapat menyembunyikan wilayah yang tetap mengalami hujan lebat atau bahkan banjir.

Telekoneksi juga mengingatkan bahwa bencana tidak dapat dibaca hanya dari besarnya anomali Pasifik. Hubungan indeks dengan hujan lokal bersifat probabilistik, dengan koefisien dan kestabilan yang berbeda dari satu wilayah ke wilayah lain. Analisis statistik yang menggunakan rentang sejarah panjang, pengamatan stasiun, data satelit, serta pengetahuan hidrologi lokal membantu mengidentifikasi sinyal yang benar-benar dapat dipakai untuk keputusan.

Telekoneksi ENSO dapat berubah menurut musim karena latar sirkulasi atmosfer pada musim yang berbeda tidak sama. Posisi sabuk hujan tropis bergeser mengikuti gerak tahunan matahari, sedangkan angin monsun dan suhu permukaan samudra berubah sepanjang tahun. Oleh sebab itu, indeks yang sama dapat memiliki pengaruh yang lebih kuat pada suatu bulan daripada bulan lain. Pengelola pangan perlu mengetahui apakah sinyal berlaku pada awal musim tanam, fase reproduktif tanaman, atau saat panen. Pengelola bendungan perlu memperhatikan curah hujan di DAS dan akumulasi musim, bukan hanya nilai indeks bulanan. Informasi berbasis musim dan sektor memberi dasar keputusan yang lebih tepat daripada proyeksi umum tanpa horizon waktu.

Indonesia bukan satu kesatuan klimatologis yang homogen. Pola hujan ekuatorial, monsun, dan lokal mempunyai waktu puncak yang berbeda. Pulau-pulau besar memiliki pegunungan dan lembah yang mengubah aliran udara;

pulau kecil dikelilingi laut sehingga respons harian darat–laut menonjol. Daerah yang berada di sisi selatan khatulistiwa biasanya mengalami musim kering dengan karakter berbeda dari daerah utara. Dalam perencanaan, batas administratif tidak selalu sama dengan batas klimatologis. Informasi yang disusun menurut zona musim, DAS, pulau kecil, atau wilayah layanan air dapat lebih relevan daripada ringkasan provinsi. Penggabungan skala lokal dan regional juga mencegah rata-rata nasional menutupi titik rawan.

## 4 Perubahan iklim menggeser keadaan dasar sistem

Pemanasan global akibat peningkatan konsentrasi gas rumah kaca menaikkan suhu rata-rata permukaan bumi dan laut. Pengaruhnya terlihat pada distribusi suhu, kandungan uap air atmosfer, permintaan evaporatif, pencairan es, dan muka laut. Menurut IPCC, pengaruh manusia telah meningkatkan frekuensi dan intensitas ekstrem panas secara luas; bukti perubahan hujan lebat dan beberapa jenis kekeringan juga menguat, meskipun tingkat keyakinan berbeda menurut wilayah dan jenis bahaya (IPCC, 2021a, 2021b). Perubahan iklim mengubah peluang dasar: suatu anomali yang sama kini terjadi pada latar suhu yang lebih tinggi daripada beberapa dekade lalu.

Analogi yang membantu ialah menganggap ENSO sebagai ayunan dan perubahan iklim sebagai lantai yang bergerak naik. Ayunan dapat bergerak ke dua arah, tetapi titik dasar yang lebih tinggi membuat sejumlah puncak panas melewati ambang dampak lebih sering. Analogi ini tidak berarti bahwa pola ENSO tidak berubah; justru perubahan sifat ENSO menjadi pokok penelitian aktif. Namun, analogi tersebut menjelaskan bahwa pemanasan latar dapat memperbesar konsekuensi kejadian alami, sekalipun perubahan amplitudo ENSO sendiri belum pasti.

Atmosfer yang lebih hangat dapat menampung lebih banyak uap air. Secara fisik, hubungan Clausius–Clapeyron menyiratkan kapasitas uap air meningkat sekitar 7 persen per derajat Celsius, meskipun intensitas hujan lokal tidak

mengikuti angka itu secara otomatis karena dipengaruhi sirkulasi dan ketersediaan kelembapan. Ketika kondisi atmosfer mendukung hujan lebat, pemanasan dapat meningkatkan intensitas curah hujan. Pada sisi kering, suhu lebih tinggi meningkatkan evaporasi dan kebutuhan air atmosfer, sehingga tanah serta vegetasi dapat mengering lebih cepat ketika hujan berkurang. Dampak ini dapat memperburuk kekeringan pertanian dan ekologi tanpa harus ada penurunan hujan yang sebanding.

Perubahan iklim juga menaikkan muka laut rata-rata, sehingga gelombang badai dan pasang tinggi mulai dari keadaan dasar yang lebih tinggi. ENSO dapat memengaruhi muka laut regional dan pola angin, sementara hujan deras dan aliran sungai menambah komponen banjir dari darat. Di kawasan pesisir, risiko banjir majemuk dapat muncul dari gabungan hujan, debit sungai, pasang, gelombang, penurunan muka tanah, dan tata ruang. Dengan demikian, menilai satu bahaya secara terisolasi dapat meremehkan risiko.

El Niño dapat menaikkan suhu rata-rata global untuk sementara karena distribusi panas antara laut dan atmosfer berubah, khususnya ketika panas yang tersimpan di laut tropis dilepaskan ke atmosfer. Pengaruh tersebut menumpang pada tren pemanasan jangka panjang. Setelah El Niño berlalu, suhu global tahunan dapat turun relatif terhadap puncaknya, tetapi tidak berarti pemanasan akibat gas rumah kaca telah berbalik. WMO menjelaskan bahwa rekor suhu 2024 merupakan hasil gabungan pemanasan antropogenik dan El Niño kuat 2023–2024 (WMO, 2025). Pemisahan komponen ini penting untuk komunikasi publik.

Pergeseran keadaan dasar tidak hanya menyangkut suhu. Perubahan tutupan es dan salju, kelembapan tanah, vegetasi, suhu laut, serta kandungan panas samudra turut memengaruhi energi dan kelembapan yang tersedia bagi atmosfer. Pada daratan tropis, suhu yang meningkat dan vegetasi yang mengalami tekanan air dapat mengurangi pendinginan melalui evapotranspirasi. Permukaan menjadi lebih panas, sehingga beban panas

manusia dan hewan meningkat. Dalam situasi El Niño, ketika hujan berkurang di wilayah tertentu, kombinasi ini dapat mempercepat pengeringan tanah dan meningkatkan stres tanaman. Pengaruhnya bukan selalu berupa berkurangnya hujan; bahkan bila defisit hujan tidak ekstrem, suhu lebih tinggi dapat meningkatkan kebutuhan air tanaman dan manusia.

Ketika kejadian iklim dinilai, ambang dampak sering lebih penting daripada rerata. Tanaman mempunyai rentang suhu yang mendukung pertumbuhan; kesehatan manusia memiliki ambang paparan panas; sistem air memiliki batas simpanan minimum; dan gambut memiliki kondisi kelembapan yang menentukan risiko pembakaran. Pemanasan dapat membuat sistem lebih sering melewati ambang tersebut meskipun perubahan rerata tampak kecil. Ambang bersifat sektoral dan lokal, sehingga tidak tersedia satu definisi universal tentang "ekstrem berbahaya". Penilaian risiko perlu menghubungkan variabel iklim dengan ambang biologis, infrastruktur, atau sosial yang relevan. Pendekatan berbasis ambang membuat hasil ilmiah lebih mudah diterjemahkan ke dalam protokol dan standar pelayanan.

## 5 Bukti dan ketidakpastian tentang ENSO dalam iklim yang menghangat

Pertanyaan apakah perubahan iklim akan membuat El Niño lebih sering atau lebih kuat telah diteliti selama puluhan tahun. Sejumlah simulasi menunjukkan kenaikan kejadian El Niño ekstrem, terutama berdasarkan ambang curah hujan di Pasifik timur. Cai et al. (2014) memperkirakan frekuensi kejadian ekstrem dapat meningkat pada pemanasan masa depan. Penelitian lanjutan menyoroti peran suhu latar dan respons hujan tropis. Namun, penilaian IPCC atas model generasi terbaru menyatakan tidak ada konsensus kuat mengenai perubahan amplitudo variabilitas suhu permukaan laut ENSO sepanjang abad ke-21, sementara peningkatan variabilitas hujan terkait ENSO dinilai lebih konsisten pada skenario pemanasan menengah hingga tinggi (IPCC, 2021a; Yun et al., 2021).

Perbedaan antara amplitudo suhu laut dan amplitudo hujan sangat penting. Di dunia yang hangat, perubahan kecil suhu laut dapat menghasilkan respons hujan yang lebih besar karena hubungan suhu–konveksi menjadi lebih curam dan atmosfer mengandung lebih banyak kelembapan. Dengan demikian, model dapat memproyeksikan variabilitas hujan ENSO meningkat tanpa harus memproyeksikan perubahan yang sama pada amplitudo indeks suhu laut. Yun et al. (2021) menganalisis proyeksi CMIP6 dan menjelaskan penguatan variabilitas hujan melalui perubahan sensitivitas hubungan suhu–hujan tropis.

Ketidakpastian muncul dari beberapa sumber: bias model dalam menggambarkan "cold tongue" Pasifik, perbedaan representasi awan dan konveksi, variasi pola pemanasan tropis, umpan balik laut–atmosfer, serta definisi kejadian ekstrem yang digunakan. Hasil juga sensitif terhadap skenario emisi dan periode pembanding. Ketidakpastian bukan berarti semua hasil sama-sama mungkin; ia menandai rentang kesimpulan yang perlu disampaikan secara proporsional. Dalam kasus ENSO, bukti untuk pengaruhnya terhadap pola cuaca antartahun kuat, sedangkan proyeksi tentang perubahan frekuensi dan amplitudo tertentu lebih beragam.

Karena itu, tiga pernyataan berikut dapat benar secara bersamaan: ENSO tetap menjadi mode variabilitas antartahun dominan; pemanasan global meningkatkan latar panas dan memperkuat sejumlah ekstrem terkait air; dan perubahan spesifik pada amplitudo suhu laut ENSO masih belum pasti. Pernyataan bahwa El Niño "disebabkan" oleh perubahan iklim atau bahwa setiap El Niño mendatang pasti akan lebih kuat melampaui bukti. Sebaliknya, menyatakan bahwa perubahan iklim tidak berpengaruh pada dampak El Niño juga keliru, sebab latar termal dan hidrologis telah berubah.

Analisis terbaru mengenai sinergi pemanasan dan ENSO juga menunjukkan bahwa pemanasan yang telah teramati memperbesar risiko sejumlah ekstrem suhu dan hujan ketika fase ENSO tertentu hadir. Studi Estrada et al. (2025) memperkirakan bahwa bagian populasi, ekonomi, pertanian, dan ekosistem

kini menghadapi risiko lebih tinggi akibat interaksi antara pemaksaan antropogenik dan ENSO. Hasil tersebut adalah analisis probabilistik lintas wilayah, bukan atribusi otomatis terhadap satu bencana. Nilainya terletak pada penjelasan bahwa faktor antropogenik dapat mengubah konsekuensi ENSO tanpa menyatakan bahwa ENSO itu sendiri sepenuhnya berasal dari aktivitas manusia.

Ketidakpastian ilmiah perlu ditafsirkan bersama rentang kemungkinan, bukan dikurangi menjadi jawaban biner. Model iklim berbeda dalam kondisi dasar Pasifik tropis; sebagian memiliki bias suhu permukaan laut yang memengaruhi lokasi konveksi. Resolusi model juga menentukan representasi awan, hujan konvektif, pulau-pulau kecil, dan topografi. Perbedaan tersebut dapat menimbulkan hasil yang berbeda untuk intensitas dan lokasi telekoneksi. Ensemble multi-model membantu menunjukkan rentang hasil, tetapi rerata ensemble tidak otomatis menjadi "ramalan terbaik" bagi satu kabupaten. Koreksi bias dan informasi pengamatan lokal dibutuhkan untuk menerjemahkan proyeksi ke keputusan investasi. Pengambil keputusan dapat memakai strategi robust decision-making: memilih tindakan yang memberi manfaat dalam berbagai skenario, kemudian menyesuaikannya ketika bukti berubah.

Proyeksi juga bergantung pada skenario emisi. Dalam skenario emisi rendah, pemanasan masa depan lebih terbatas dibanding jalur emisi tinggi, sehingga perubahan latar panas dan siklus air juga lebih kecil. Model tidak memberi kepastian mengenai cuaca pada satu tanggal di masa depan; ia memberikan gambaran statistik dari kondisi yang mungkin jika jalur emisi tertentu terjadi. Karena itu, proyeksi bukan alasan untuk menganggap masa depan telah ditentukan. Pilihan kebijakan saat ini memengaruhi emisi dan dengan demikian memengaruhi risiko lintas generasi. Adaptasi menangani dampak yang tidak dapat dihindari, sedangkan mitigasi menentukan seberapa jauh tekanan tambahan akan berkembang.

## 6 Dari bahaya menuju risiko bencana melalui paparan dan kerentanan

Bahaya iklim adalah kejadian atau tren fisik yang berpotensi menimbulkan dampak merugikan, seperti kekeringan, hujan ekstrem, gelombang panas, atau kebakaran cuaca. Risiko bencana terbentuk melalui interaksi bahaya dengan paparan dan kerentanan. Paparan berarti keberadaan penduduk, infrastruktur, mata pencaharian, aset ekonomi, dan ekosistem di lokasi yang dapat terdampak. Kerentanan adalah kondisi yang membuat unsur terpapar lebih mudah mengalami kerugian atau lebih sulit pulih. Kapasitas, termasuk sumber daya, pengetahuan, kelembagaan, dan jaringan sosial, dapat menurunkan risiko.

Konsekuensinya, sinyal El Niño yang sama tidak menghasilkan tingkat kerugian yang sama. Dua desa dengan curah hujan yang serupa dapat mengalami hasil berbeda bila satu memiliki waduk, akses informasi, benih yang sesuai, dan perlindungan pekerja, sedangkan yang lain bergantung pada tadah hujan dan memiliki rumah tangga miskin dengan akses air terbatas. Suatu kekeringan menjadi krisis pangan ketika gangguan produksi bertemu stok rendah, distribusi terganggu, daya beli melemah, dan bantuan terlambat. Peristiwa iklim bekerja melalui sistem sosial dan ekonomi, bukan di luar sistem itu.

Istilah “bencana alam” kadang menutupi peran keputusan manusia. Hujan ekstrem merupakan bahaya meteorologis; banjir yang merusak permukiman di dataran banjir, diperburuk drainase buruk dan penurunan tanah, adalah hasil pertemuan bahaya dengan paparan dan kerentanan. Kekeringan meteorologis dapat menjadi kekeringan hidrologis, pertanian, atau sosial-ekonomi melalui jalur waktu yang berbeda. Kebakaran hutan dan lahan memerlukan bahan bakar kering, tetapi penyalaan dan tata kelola lahan sering menentukan apakah kebakaran terjadi dan seberapa luas ia menyebar.

Kerangka risiko juga menyarankan agar penilaian tidak hanya mencatat frekuensi bencana masa lalu. Data kerugian dipengaruhi kualitas pencatatan,

perubahan aset dan populasi, definisi kejadian, dan pertumbuhan ekonomi. Kerugian nominal dapat naik hanya karena nilai aset bertambah. Untuk melihat risiko iklim, data historis perlu disandingkan dengan peta paparan, indikator kerentanan, skenario iklim, serta kapasitas adaptasi. Dalam penganggaran, langkah ini membantu menghindari perlakuan yang sama terhadap wilayah yang memiliki kondisi berbeda.

Paparan dan kerentanan berubah sepanjang waktu. Pertumbuhan kota dapat memperluas kawasan terbangun ke dataran banjir; perubahan mata pencaharian dapat meningkatkan ketergantungan pada air irigasi; dan pembangunan jalan dapat meningkatkan akses pemadaman sekaligus membuka lahan baru. Karena itu, risiko tidak dapat diperkirakan hanya dengan mengambil peta bahaya historis dan menempelkannya pada kondisi sekarang. Peta perlu diperbarui ketika populasi, aset, tutupan lahan, dan layanan berubah. Pengurangan kerentanan dapat berlangsung melalui layanan dasar, pendidikan risiko, kesehatan, akses kredit, perlindungan sosial, dan tata ruang yang adil. Perencanaan semacam ini membuat pengurangan risiko bencana menjadi bagian dari pembangunan, bukan proyek terpisah yang hanya aktif saat keadaan darurat.

Kerentanan dapat berkurang apabila pembangunan memperkuat layanan dasar dan hak warga. Akses air bersih, fasilitas kesehatan, pendidikan, informasi tepercaya, tabungan, dan jaringan sosial menentukan kemampuan rumah tangga menghadapi kehilangan pendapatan atau gangguan layanan. Kapasitas tersebut tidak menggantikan pengurangan bahaya, tetapi dapat mengurangi dampak dan mempercepat pemulihan. Kajian pascabencana perlu mencatat siapa pulih lebih cepat dan siapa tetap menanggung kerugian lama. Jika bantuan hanya mengembalikan keadaan sebelum bencana, kerentanan struktural dapat bertahan. Pemulihan yang lebih baik seharusnya mengurangi faktor yang menghasilkan kerugian, misalnya memperbaiki akses air, layanan kesehatan, dan tata ruang.

Untuk menghindari penilaian yang terlalu sempit, indeks kerentanan sebaiknya disusun dengan partisipasi masyarakat dan diuji terhadap pengalaman nyata. Variabel seperti kepemilikan aset, usia, kesehatan, bahasa, akses transportasi, dan status lahan dapat menjelaskan mengapa kelompok tertentu tertinggal dalam menerima bantuan. Indeks komposit memudahkan pemetaan, tetapi bobot dan kualitas datanya dapat menyembunyikan perbedaan penting. Peta risiko perlu disertai narasi lokal, verifikasi lapangan, dan mekanisme pembaruan. Dengan demikian, angka tidak menjadi pengganti pengetahuan masyarakat, melainkan alat untuk mengarahkan perhatian dan sumber daya.

## 7 Kekeringan kebakaran dan kualitas udara di Indonesia

Kekeringan meteorologis dimulai ketika curah hujan berada di bawah normal selama periode tertentu. Jika defisit berlangsung, kelembapan tanah menurun dan kekeringan pertanian muncul; berikutnya, aliran dan simpanan air dapat menurun sehingga terjadi kekeringan hidrologis. Pada wilayah yang mengandalkan hujan, keterlambatan awal musim dapat mengganggu kalender tanam sebelum kekeringan mencapai indikator aliran sungai. Rangkaian ini menunjukkan mengapa pemantauan satu variabel curah hujan tidak cukup untuk mengukur dampak.

El Niño dan IOD dapat meningkatkan peluang musim kering yang lebih panjang atau lebih kering di beberapa wilayah Indonesia. Penelitian mengenai kekeringan Indonesia menunjukkan hubungan spasial dan temporal yang dapat diprediksi dengan ensemble multi-model, namun tingkat keterampilan prakiraan berbeda menurut wilayah dan musim (Setiawan et al., 2017). Untuk Jawa, penggunaan indikator kekeringan berbasis satelit dan SPI membantu menghubungkan defisit hujan dengan sentra padi (Siswanto et al., 2022). Ini memberi contoh bagaimana indeks iklim global diterjemahkan menjadi informasi untuk pertanian lokal.

Kebakaran hutan dan lahan bukan konsekuensi otomatis dari El Niño. Kondisi kering meningkatkan kemudahan penyalaan dan penyebaran api, tetapi pembukaan lahan, drainase gambut, aktivitas manusia, akses pemadaman, dan tata kelola menentukan kejadian serta skalanya. Gambut yang dikeringkan menjadi mudah terbakar; api bawah permukaan dapat bertahan lama dan sukar dipadamkan. Kebakaran menghasilkan partikulat halus, karbon monoksida, serta gas dan aerosol lain yang menurunkan kualitas udara lintas wilayah. Oleh sebab itu, strategi kebakaran harus menggabungkan prakiraan iklim dengan pencegahan pembakaran, pengelolaan hidrologi gambut, patroli, penegakan hukum, dan perlindungan kesehatan.

Studi Field et al. (2016) tentang musim kebakaran 2015 menunjukkan sensitivitas nonlinear kebakaran dan asap Indonesia terhadap kekeringan yang terkait El Niño, terutama pada lahan gambut terdegradasi dan penggunaan api untuk pembukaan lahan. "Nonlinear" berarti sedikit tambahan kekeringan dapat beriringan dengan peningkatan dampak yang jauh lebih besar setelah bahan bakar dan gambut melewati ambang kering tertentu. Hal tersebut menjelaskan mengapa kesiapsiagaan perlu dimulai sebelum indikator kekeringan mencapai kondisi ekstrem.

Pemanasan global dapat memperburuk bahaya melalui suhu yang lebih tinggi dan peningkatan evaporasi. Akan tetapi, luas kebakaran juga dapat turun melalui tata kelola yang lebih baik sekalipun iklim tetap panas. Ukuran keberhasilan tidak semata jumlah hotspot pada satu hari, melainkan luas terbakar, emisi, paparan penduduk terhadap PM2.5, lama gangguan sekolah dan transportasi, serta kemampuan masyarakat rentan memperoleh ruang udara bersih dan layanan kesehatan. Dalam narasi publik, penting membedakan pemicu iklim, sumber penyalaan, dan kondisi tata guna lahan.

Pengalaman 1997–1998, 2006, 2015, dan musim kering lainnya menunjukkan bahwa dampak kebakaran mempunyai dimensi lintas batas. Asap menurunkan jarak pandang, mengganggu penerbangan dan transportasi, menutup sekolah,

membebani fasilitas kesehatan, serta menimbulkan kerugian ekonomi. Namun, membandingkan kejadian historis memerlukan kehati-hatian karena sistem satelit, metode estimasi emisi, jumlah penduduk, dan tata guna lahan berubah. Penguatan sistem kesehatan dan perlindungan pekerja dapat mengurangi paparan bahkan ketika pencegahan kebakaran tidak berhasil sepenuhnya. Data kualitas udara real-time, protokol penutupan sekolah, dan komunikasi yang menjangkau masyarakat desa serta pekerja harian merupakan komponen manajemen risiko yang konkret.

Pengelolaan risiko kebakaran mengandalkan kalender kesiapsiagaan. Pada masa sebelum kemarau, pemerintah dapat memetakan lahan kering, memeriksa sekat kanal, menguji pompa, dan memastikan kelompok pemadam memiliki peralatan. Saat kemarau berkembang, patroli dan pemantauan titik panas dipadukan dengan verifikasi lapangan; satelit memberi petunjuk lokasi, tetapi tidak selalu memastikan sumber api atau status kebakaran. Setelah hujan datang, evaluasi meliputi pemulihan gambut, pencatatan emisi, kesehatan warga, dan pembelajaran tata kelola. Urutan ini memperlihatkan bahwa respons tidak dapat dimulai hanya ketika asap sudah terlihat. Pekerjaan pencegahan membutuhkan pendanaan tetap dan koordinasi lintas musim.

Tindakan pada sumber risiko juga perlu mempertimbangkan insentif ekonomi. Petani kecil dapat menggunakan api karena biaya pembukaan lahan tanpa bakar lebih tinggi atau dukungan teknis tidak tersedia. Program pencegahan yang efektif menyediakan pilihan kerja, alat, pendampingan, akses pasar, serta kepastian hak dan aturan. Perusahaan pemasok komoditas perlu melakukan uji tuntas rantai pasokan, mengawasi konsesi, dan menyampaikan tindakan korektif secara transparan. Penegakan hukum tetap penting, tetapi pencegahan lebih berkelanjutan apabila struktur insentif dan kapasitas lokal turut diperbaiki. Tanggung jawab perlu mencakup pelaku yang memperoleh manfaat ekonomi dan bukan hanya warga yang tinggal dekat kawasan api.

## 8 Hujan ekstrem banjir dan risiko yang tidak searah

Narasi El Niño sering didominasi kekeringan, tetapi pengaruh ENSO terhadap hujan dan banjir bergantung pada wilayah. Di sejumlah daerah dunia, El Niño berasosiasi dengan peningkatan curah hujan; di tempat lain, La Niña dapat memperbesar risiko banjir. Ward et al. (2014) menunjukkan ENSO memengaruhi risiko banjir di cekungan sungai yang mencakup hampir 44 persen daratan dunia dalam analisis mereka. Temuan ini memperlihatkan potensi prakiraan ENSO bagi pengelolaan risiko banjir, namun bukan peta sederhana yang dapat diterapkan tanpa validasi lokal.

Pemanasan atmosfer meningkatkan potensi hujan intens ketika dinamika sirkulasi menyediakan kelembapan dan pengangkatan udara. IPCC menilai frekuensi serta intensitas hujan lebat meningkat di banyak wilayah dengan cakupan pengamatan memadai, dan pengaruh manusia kemungkinan merupakan pendorong utama tren global tersebut (IPCC, 2021a, 2021b). Namun, dampak banjir juga ditentukan oleh karakter DAS, perubahan tutupan lahan, kapasitas drainase, kondisi sungai, sedimentasi, pasang, serta penurunan muka tanah. Karena itu, analisis banjir di kota pesisir seperti Jakarta perlu menggabungkan hujan lokal, aliran hulu, pasang laut, dan subsiden.

Sistem iklim dapat menghasilkan peristiwa majemuk: kekeringan di satu daerah, hujan ekstrem di daerah lain; panas yang bersamaan dengan defisit kelembapan tanah; atau hujan intens yang terjadi saat tanah, waduk, dan sungai telah mengalami kondisi tertentu. Risiko majemuk juga muncul secara berurutan. Sebagai contoh, kemarau panjang menurunkan cadangan air, lalu hujan pertama datang sangat intens sehingga menimbulkan limpasan dan banjir lokal. Istilah “compound events” merujuk pada gabungan beberapa faktor atau kejadian yang menghasilkan dampak lebih besar daripada komponen tunggalnya.

Kesiapsiagaan yang hanya berfokus pada satu sisi—misalnya penghematan air ketika El Niño, tanpa memperhatikan banjir setelah musim kering—dapat menciptakan titik buta. Pemerintah daerah perlu menyesuaikan operasi waduk, pemeliharaan drainase, tata ruang, dan protokol kesehatan sepanjang siklus musim. Infrastruktur yang fleksibel dapat membantu, seperti tampungan yang dikelola adaptif, sistem resapan perkotaan, perlindungan sempadan sungai, dan rute evakuasi yang memperhitungkan banjir serta panas. Langkah-langkah ini juga memberi manfaat pada tahun ENSO netral.

Satu daerah tangkapan air dapat memperlihatkan hubungan hujan dan banjir yang berbeda dari daerah lain. Pada DAS dengan tanah jenuh atau permukaan kedap, hujan intens dalam durasi pendek dapat menghasilkan limpasan cepat. Pada kawasan yang mengalami kekeringan panjang, retakan tanah, hilangnya tutupan vegetasi, kebakaran, atau perubahan struktur permukaan dapat mengubah infiltrasi dan erosi. Tidak semua tanah kering otomatis menyerap air lebih sedikit; sifat tanah, kemiringan, penggunaan lahan, dan intensitas hujan menentukan hasil. Oleh sebab itu, desain drainase dan restorasi lanskap perlu memakai data setempat serta pengamatan lapangan. Informasi ENSO memberi konteks probabilistik, sedangkan peringatan banjir harian membutuhkan data hujan, radar, tinggi muka air, dan kondisi DAS.

Rencana banjir perlu mengantisipasi kegagalan berantai. Hujan lebat dapat mengganggu jaringan listrik, komunikasi, transportasi, dan layanan kesehatan pada saat evakuasi diperlukan. Kawasan yang dilindungi tanggul mungkin masih menghadapi risiko jika pompa gagal atau akses terputus. Sistem peringatan harus menjangkau warga di bantaran sungai, kawasan padat, dan wilayah pesisir dengan format yang dapat ditindaklanjuti. Rute evakuasi harus diuji pada kondisi hujan malam hari, bukan hanya pada peta. Perencanaan ini juga berlaku di daerah yang kerap mengalami kemarau karena ENSO tidak menjamin tidak terjadi hujan ekstrem selama musim kering.

## 9 Dampak pada pangan air energi kesehatan dan ekosistem

Pertanian sangat sensitif terhadap waktu hujan dan suhu pada fase pertumbuhan. El Niño yang menunda hujan dapat menggeser waktu tanam, meningkatkan kebutuhan irigasi, atau menyebabkan gagal panen. Namun, respons produksi tidak seragam: jenis tanaman, varietas, kalender tanam, ketersediaan air, kesuburan tanah, harga, dan dukungan penyuluhan membentuk dampak akhir. Telaah sistematis terbaru tentang El Niño dan IOD positif di negara Indo-Pasifik berpendapatan rendah dan menengah mencatat bukti Indonesia tentang produksi dan produktivitas pertanian tidak selalu konsisten; hasilnya berbeda menurut tanaman, lokasi, dan ukuran yang digunakan (Floridi et al., 2025). Kebijakan pangan karenanya perlu menggabungkan data produksi dengan harga, stok, distribusi, dan akses rumah tangga.

Ketahanan air bergantung pada hubungan antara hujan, simpanan waduk, air tanah, kebutuhan domestik, industri, irigasi, dan ekosistem. Saat kemarau, persaingan kebutuhan dapat meningkat. Pengambilan air tanah yang tidak terkendali dapat menurunkan muka air dan memperburuk penurunan tanah, terutama di kota. Solusi tidak terbatas pada pembangunan waduk baru; pengurangan kebocoran, penggunaan ulang air, perlindungan daerah imbuhan, efisiensi irigasi, dan pengelolaan permintaan sering memberi manfaat yang lebih cepat serta lebih merata.

Sektor energi juga terpapar. Pembangkit listrik tenaga air bergantung pada aliran; suhu tinggi meningkatkan permintaan pendinginan dan listrik; kekeringan dapat memengaruhi operasi pembangkit tertentu; dan logistik bahan bakar bergantung pada kondisi sungai serta pelabuhan. Pengelola sistem energi perlu menggunakan prakiraan musiman untuk menguji kecukupan pasokan dan cadangan, sambil mempercepat diversifikasi sumber energi. Dalam jangka panjang, pengurangan emisi melalui transisi energi mengurangi pemaksaan iklim yang memperbesar risiko pada masa depan.

Kesehatan masyarakat dipengaruhi panas, kekeringan, asap kebakaran, keterbatasan air bersih, kualitas pangan, dan gangguan layanan. Paparan PM2.5 dapat meningkatkan beban penyakit pernapasan dan kardiovaskular; panas menambah risiko bagi pekerja luar ruang, lansia, bayi, ibu hamil, serta orang dengan penyakit kronis. Dampak kesehatan juga bergantung pada akses fasilitas, komunikasi risiko, kondisi rumah, dan perlindungan di tempat kerja. Respons yang efektif mencakup peringatan kualitas udara, ruang aman, protokol sekolah, layanan kesehatan primer, dan dukungan bagi pekerja informal.

Ekosistem mengalami tekanan dari suhu, kekeringan, kebakaran, perubahan aliran, dan gangguan spesies. Hutan, lahan basah, terumbu karang, mangrove, dan gambut memiliki kapasitas penyangga yang berbeda. El Niño kuat dapat memicu pemutihan karang melalui suhu laut, sedangkan kekeringan dan api memengaruhi hutan serta lahan gambut. Ekosistem yang sehat menyimpan air, menstabilkan tanah, dan melindungi garis pantai; tetapi daya lentingnya tidak tak terbatas. Konservasi, restorasi, dan pengurangan tekanan lokal memperbesar kemampuan ekosistem menghadapi variasi iklim.

Rantai pasokan memperluas dampak kejadian iklim melampaui wilayah yang terkena bahaya langsung. Kekeringan di satu daerah produksi dapat memengaruhi harga dan ketersediaan pangan di pasar lain; gangguan pelabuhan atau sungai dapat menunda distribusi; dan kenaikan biaya energi dapat mendorong biaya produksi. Rumah tangga miskin mengalokasikan bagian lebih besar dari pendapatan untuk pangan dan transportasi, sehingga kenaikan harga dapat lebih cepat menurunkan kesejahteraan mereka. Pemantauan risiko karenanya perlu memasukkan indikator harga, stok, logistik, serta kemampuan rumah tangga memperoleh pangan. Kebijakan cadangan pangan dan impor dapat berfungsi sebagai penyangga, tetapi keputusan pasokan harus memperhatikan petani domestik, harga konsumen, dan keberlanjutan produksi.

Dampak kesehatan sering tertunda dan tidak langsung terlihat dalam laporan bencana. Panas dapat memperburuk kondisi pasien kronis; asap menimbulkan keluhan yang tetap bertahan setelah api padam; kekurangan air mengganggu kebersihan, pengolahan makanan, dan layanan klinik. Rumah sakit membutuhkan rencana kesinambungan layanan untuk listrik, air, obat, dan transportasi tenaga kesehatan. Data kunjungan, rawat inap, absensi kerja, dan kualitas udara dapat membantu memetakan pola dampak. Informasi tersebut perlu dijaga dengan prinsip privasi dan digunakan secara etis. Penguatan puskesmas serta layanan komunitas membantu mendeteksi kelompok berisiko sebelum dampak menjadi berat.

## 10 Peramalan peringatan dini dan tindakan antisipatif

Perkiraan ENSO beberapa bulan ke depan tidak otomatis menjadi peringatan yang dapat digunakan. Informasi harus diterjemahkan menjadi ambang keputusan yang jelas. Sebuah dinas pertanian mungkin membutuhkan peluang awal musim mundur untuk mengatur jadwal tanam; pengelola waduk membutuhkan prakiraan inflow; dinas kesehatan membutuhkan proyeksi panas dan asap; pemerintah desa memerlukan informasi air minum dan kemungkinan kebakaran. Peringatan dini berbasis dampak menggabungkan bahaya, paparan, kerentanan, serta tindakan yang perlu diambil.

Rangkaian peringatan terdiri atas pemantauan, prakiraan, komunikasi, kesiapan, dan respons. Jika salah satu mata rantai gagal, informasi ilmiah tidak mengurangi risiko. Prakiraan dapat sangat baik namun tidak bermanfaat bila diterbitkan terlalu teknis, terlambat, tidak menjangkau kelompok rentan, atau tidak disertai sumber daya untuk bertindak. Sebaliknya, informasi probabilistik dapat bernilai tinggi bila institusi telah menyepakati sebelumnya siapa melakukan apa pada tingkat peluang tertentu.

Tindakan antisipatif memindahkan sebagian respons sebelum dampak terjadi. Contoh di sektor pertanian ialah distribusi varietas berumur pendek,

penyesuaian kalender tanam, atau pengamanan pasokan pakan. Di wilayah rawan api, patroli dan pembasahan kanal dapat diprioritaskan sebelum puncak kering. Pemerintah daerah dapat menyiapkan tangki air, perlindungan pekerja, masker sesuai standar, dan ruang aman sebelum kabut asap memburuk. Desain yang baik menghindari bantuan yang terlalu dini tanpa dasar, tetapi juga tidak menunggu bukti kerusakan ketika jendela tindakan sudah tertutup.

Prakiraan musiman memiliki ketidakpastian dan skala spasial terbatas. Penyedia informasi perlu menjelaskan probabilitas, periode validitas, wilayah, serta kondisi pembaruan. Pengguna perlu menyampaikan konsekuensi keputusan yang berbeda antara "hujan mungkin di bawah normal" dan "akan terjadi kekeringan ekstrem." Praktik dialog dua arah—antara BMKG, lembaga riset, pemerintah, petani, perusahaan air, dan komunitas—membantu menerjemahkan prakiraan ke tindakan yang masuk akal. Pendekatan ini sejalan dengan rekomendasi literatur pengurangan risiko bencana yang menekankan pemanfaatan prakiraan ENSO untuk mengurangi kerugian (Guimarães Nobre et al., 2019).

Kualitas peringatan dapat diukur melalui ketepatan waktu, jangkauan, kejelasan, tingkat kepercayaan, dan proporsi penerima yang mampu mengambil tindakan. Evaluasi juga perlu mencatat alarm palsu dan kejadian yang terlewat. Jika alarm palsu berulang, masyarakat dapat kehilangan kepercayaan; jika peringatan terlambat, kesempatan memindahkan ternak, menyiapkan air, atau menutup kanal gambut mungkin sudah lewat. Sistem perlu memiliki mekanisme umpan balik setelah setiap musim. Data prakiraan dapat disajikan melalui pesan singkat, radio komunitas, aplikasi, penyuluh, dan pertemuan desa agar tidak bergantung pada satu kanal digital. Desain yang inklusif mempertimbangkan bahasa lokal, disabilitas, konektivitas, dan waktu kerja masyarakat.

Peluang prakiraan dapat dikaitkan dengan biaya keputusan melalui analisis nilai informasi. Sebagai contoh, biaya menyiapkan cadangan air mungkin lebih

rendah daripada kerugian ketika produksi terhenti, tetapi manfaatnya bergantung pada peluang dan durasi kemarau. Analisis semacam ini tidak mengubah prakiraan menjadi kepastian; ia menunjukkan pada tingkat risiko berapa tindakan masuk akal. Pengguna dapat membandingkan keputusan yang tersedia, kerugian jika bertindak terlalu awal, serta kerugian bila terlambat. Mekanisme pendanaan yang telah disepakati sebelumnya mempercepat tindakan ketika ambang tercapai. Evaluasi setelah musim menguji apakah ambang itu tepat atau perlu disesuaikan.

Perubahan prakiraan dari satu pembaruan ke pembaruan berikutnya dapat menimbulkan kebingungan bila pengguna tidak memahami sifat probabilistiknya. Lembaga perlu menjelaskan bahwa probabilitas dapat berubah seiring pengamatan baru, terutama ketika dinamika laut dan atmosfer masih berkembang. Produk prakiraan sebaiknya menampilkan rentang kemungkinan, bukan hanya satu angka atau kategori warna. Pengguna dapat memilih tindakan yang sebanding dengan biaya dan konsekuensi keputusan. Pelatihan bagi penyuluh, petugas lapangan, dan jurnalis memperkuat kemampuan menjelaskan risiko tanpa menimbulkan kepastian palsu. Kredibilitas meningkat ketika ketidakpastian disampaikan sejak awal, bukan setelah prakiraan berubah.

## 11 Tata kelola risiko dan keadilan sosial

Risiko iklim tidak terbagi merata. Rumah tangga berpendapatan rendah sering tinggal di wilayah dengan layanan air, sanitasi, dan drainase terbatas; pekerja informal memiliki perlindungan kerja yang lemah; masyarakat adat dan komunitas lokal dapat kehilangan akses terhadap sumber daya ketika kebijakan konservasi atau kebakaran tidak melibatkan mereka. Perempuan sering memikul tanggung jawab pengelolaan air dan pangan rumah tangga, sementara memiliki akses sumber daya dan pengambilan keputusan yang tidak

setara. Kebijakan adaptasi perlu menilai siapa mendapat manfaat, siapa menanggung biaya, serta suara siapa yang tidak terdengar.

Tata kelola El Niño membutuhkan koordinasi lintas lembaga dan lintas tingkat pemerintahan. Informasi iklim berada pada lembaga meteorologi; data lahan dan kebakaran tersebar di lembaga kehutanan, lingkungan, pertanian, dan kebencanaan; sedangkan dampak kesehatan serta pangan dikelola sektor berbeda. Mekanisme koordinasi yang hanya aktif saat darurat akan kehilangan waktu untuk tindakan antisipatif. Forum rutin sebelum musim kering, protokol berbagi data, peta tanggung jawab, dan pembiayaan kontinjensi membantu mengubah prakiraan menjadi pelaksanaan.

Pengelolaan gambut menggambarkan pentingnya tata kelola jangka panjang. Pembasahan kembali, pemulihan hidrologi, pemantauan kanal, penyelesaian konflik pemanfaatan, dan alternatif mata pencaharian perlu berjalan bersama. Jika kebijakan hanya melarang pembakaran tanpa dukungan terhadap praktik dan ekonomi lokal, kepatuhan dapat rendah. Jika pengawasan lemah, insentif jangka pendek pembukaan lahan terus mendominasi. Adaptasi yang adil menempatkan komunitas sebagai mitra perancangan dan pelaksanaan, bukan sekadar penerima perintah.

Perlindungan sosial adaptif dapat membantu rumah tangga mengatasi guncangan tanpa menjual aset produktif atau mengurangi asupan pangan. Mekanismenya dapat berupa bantuan tunai yang responsif terhadap indeks risiko, jaminan pangan, layanan kesehatan, perlindungan pekerja, dan dukungan pemulihan mata pencaharian. Namun, indeks pemicu harus diuji agar tidak mengecualikan kelompok yang mengalami dampak lokal meskipun indikator agregat tidak melewati ambang. Pengaduan dan evaluasi independen memperbaiki akuntabilitas.

Keadilan prosedural sama pentingnya dengan keadilan distribusi. Masyarakat yang terdampak perlu dilibatkan ketika prioritas pembangunan air,

pembasahan gambut, relokasi, atau perlindungan kebakaran dirancang. Partisipasi memberi informasi tentang sumber air yang digunakan, kalender lokal, akses lahan, dan hambatan menerima bantuan. Mekanisme konsultasi perlu memberi ruang kepada kelompok yang biasanya kurang terwakili serta memastikan keputusan dan alasan kebijakan dapat ditelusuri. Bila terjadi kerugian, mekanisme pengaduan harus mudah diakses dan tidak menambah beban administrasi yang tidak proporsional. Tata kelola yang transparan membantu mengurangi konflik dan meningkatkan legitimasi tindakan antisipatif.

Pembagian kewenangan perlu disertai pembagian biaya dan data. Pemerintah desa mungkin menerima informasi dan tanggung jawab untuk kesiapsiagaan, tetapi tidak memiliki anggaran untuk air tangki atau pemadaman. Pemerintah kabupaten memiliki sumber daya namun membutuhkan data yang cepat dan mekanisme koordinasi. Pemerintah pusat mengelola instrumen nasional, standar dan cadangan. Kesepakatan antarlevel perlu menjelaskan kapan dana kontinjensi dapat diakses, bagaimana prioritas wilayah ditentukan, dan bagaimana pelaksanaan dilaporkan. Tanpa hubungan itu, desentralisasi dapat menghasilkan tanggung jawab yang tidak diikuti kapasitas. Perencanaan yang adil memastikan dukungan tersedia sebelum krisis, terutama bagi daerah yang paling rentan.

## 12 Adaptasi mitigasi dan pengelolaan risiko yang tangguh

Adaptasi mengurangi kerentanan terhadap dampak yang telah terjadi atau diperkirakan; mitigasi mengurangi sumber emisi atau meningkatkan serapan gas rumah kaca. Keduanya berkaitan tetapi tidak saling menggantikan. Peningkatan efisiensi irigasi membantu menghadapi kemarau, sementara pengurangan emisi memperlambat pemanasan yang akan memperbesar tekanan panas dan evaporasi di masa depan. Restorasi gambut dapat

mengurangi risiko api sekaligus melindungi stok karbon, sehingga memberi manfaat adaptasi dan mitigasi.

Strategi yang tangguh bekerja di beragam kondisi ENSO dan masa depan iklim. Misalnya, diversifikasi sumber air mengurangi ketergantungan pada hujan, tetapi dapat menambah tekanan lingkungan jika air tanah diambil tanpa batas. Infrastruktur perlu mempertimbangkan skenario iklim, standar keselamatan, pemeliharaan, dan kebutuhan kelompok rentan. Keputusan investasi dapat menggunakan pendekatan jalur adaptasi: langkah awal berbiaya rendah segera dilakukan, lalu pemicu tertentu menentukan kapan perlu peningkatan kapasitas atau perubahan sistem yang lebih mendasar.

Di sektor pertanian, portofolio adaptasi mencakup varietas toleran kekeringan, penyesuaian kalender tanam, pertanian konservasi, diversifikasi tanaman, asuransi yang dirancang baik, layanan penyuluhan dan akses prakiraan. Di perkotaan, ruang hijau, permukaan berpori, drainase terawat, perlindungan sumber air, dan rencana panas dapat mengurangi risiko gabungan. Di pesisir, restorasi mangrove dan pengaturan ruang perlu diselaraskan dengan dinamika sedimentasi, kebutuhan mata pencaharian, dan kenaikan muka laut. Satu solusi teknis tidak menyelesaikan seluruh risiko jika tata kelola lahan dan distribusi manfaat diabaikan.

Adaptasi maladaptif muncul ketika tindakan menurunkan risiko untuk satu kelompok atau jangka pendek tetapi meningkatkan risiko bagi kelompok lain atau masa depan. Contohnya, sumur dalam mungkin membantu sebagian pengguna selama kekeringan namun mempercepat penurunan tanah dan mengurangi akses warga miskin. Tanggul dapat melindungi satu kawasan sambil memindahkan banjir ke kawasan lain. Proyek perlu menguji konsekuensi lintas skala, distribusi risiko, dan ketergantungan baru yang diciptakannya. Pembelajaran adaptif dan transparansi data merupakan bagian dari desain, bukan tambahan setelah proyek selesai.

Pilihan adaptasi perlu dibandingkan menurut efektivitas, biaya siklus hidup, waktu pelaksanaan, dampak ekologis, dan distribusi manfaat. Infrastruktur keras dapat melindungi layanan penting, namun memerlukan pemeliharaan dan dapat menciptakan rasa aman palsu bila pembangunan di kawasan berbahaya tetap berlanjut. Solusi berbasis alam dapat memberi manfaat tambahan bagi biodiversitas dan kualitas hidup, tetapi perlu dilandasi kondisi ekologis yang sesuai dan tata kelola lahan. Kombinasi infrastruktur abu-abu, hijau, dan sosial sering lebih tangguh daripada mengandalkan satu jenis intervensi. Anggaran juga harus mencakup operasi dan pemeliharaan; investasi awal tanpa pendanaan jangka panjang dapat membuat sistem gagal tepat ketika dibutuhkan.

Pengurangan emisi dapat dikaitkan dengan keputusan organisasi melalui inventarisasi energi, pengadaan, transportasi, bangunan, dan rantai pasokan. Bagi universitas atau rumah sakit, efisiensi energi dapat menurunkan biaya operasi sekaligus mengurangi emisi; pengelolaan air dan ruang hijau dapat meningkatkan daya tahan terhadap panas. Pada skala nasional, perlindungan hutan dan gambut, transisi energi, serta pembenahan tata kelola lahan berkontribusi terhadap tujuan iklim. Namun, manfaat kebijakan perlu diukur dengan indikator dan batas yang transparan agar klaim pengurangan emisi tidak berlebihan. Mitigasi yang konsisten memperlambat penambahan risiko yang harus dihadapi generasi berikutnya.

## 13 Atribusi ilmiah dan komunikasi yang bertanggung jawab

Atribusi iklim mengukur bagaimana faktor tertentu mengubah peluang atau intensitas suatu kejadian. Ada pertanyaan atribusi terhadap penyebab: faktor mana yang menghasilkan tren; dan atribusi peristiwa: seberapa besar perubahan iklim memengaruhi probabilitas atau intensitas kejadian yang diamati. Analisis peristiwa biasanya membandingkan simulasi dunia faktual dengan dunia kontrafaktual tanpa pengaruh manusia, memakai model dan

data pengamatan. Kesimpulannya bersifat probabilistik dan memiliki rentang ketidakpastian.

Untuk satu kekeringan di Indonesia, analisis yang baik dapat menilai kontribusi ENSO dan IOD terhadap curah hujan, pengaruh pemanasan terhadap evaporasi dan suhu, serta peran pengelolaan air dan perubahan lahan terhadap dampak. Pernyataan "El Niño menyebabkan bencana" terlalu ringkas jika tidak membedakan bahaya dari konsekuensi. Pernyataan "perubahan iklim menyebabkan seluruh kekeringan" juga tidak akurat. Formulasi yang lebih tepat menyebut bahwa ENSO menggeser peluang pola hujan, pemanasan meningkatkan tekanan panas dan permintaan evaporatif, sementara paparan dan kerentanan menentukan kerugian.

Komunikasi ketidakpastian harus membedakan ketidakpastian ilmiah dari ketidakpastian tindakan. Mungkin terdapat rentang prakiraan hujan, tetapi nilai air bersih untuk rumah tangga dan biaya pencegahan kebakaran sudah diketahui. Keputusan berisiko rendah dan bermanfaat dalam banyak skenario dapat diambil sekarang. Penggunaan bahasa yang lugas, grafik probabilitas yang mudah dibaca, dan contoh dampak lokal lebih efektif daripada menyebut angka indeks tanpa konteks.

Media dan pemimpin publik perlu menghindari dua ekstrem: alarmisme yang tidak didukung bukti dan penyangkalan terhadap tren yang sudah terukur. Judul berita sebaiknya menjelaskan wilayah, periode, dan sifat probabilistik prakiraan. Pembedaan antara anomali jangka pendek dan tren jangka panjang membantu masyarakat memahami mengapa suhu tahunan dapat berfluktuasi sementara tren pemanasan tetap naik. Kepercayaan publik tumbuh ketika lembaga bersedia memperbarui prakiraan, menjelaskan kesalahan, dan mengakui keterbatasan data.

Pernyataan atribusi perlu memuat wilayah, jenis kejadian, jangka waktu, pembanding, dan tingkat keyakinan. Peneliti dapat menyimpulkan bahwa

pengaruh manusia meningkatkan peluang gelombang panas, tetapi tidak berarti seluruh aspek satu peristiwa memiliki penyebab tunggal. Untuk ENSO, suatu studi mungkin menemukan perubahan pola risiko hujan ekstrem pada kondisi pemanasan tertentu, sementara studi lain menghasilkan rentang yang lebih lebar untuk amplitudo indeks laut. Ringkasan yang baik membedakan apa yang telah diamati, apa yang disimulasikan, serta apa yang masih menjadi hipotesis. Jurnalis dan pejabat dapat menyebut sumber penilaian yang digunakan dan menghindari penggunaan kata "pasti" jika hasilnya probabilistik.

Bahasa risiko dapat disusun dengan tiga komponen: peluang, dampak yang mungkin, dan tindakan. Misalnya, sebuah peringatan menjelaskan bahwa peluang hujan di bawah normal meningkat di wilayah tertentu pada periode tertentu; kondisi tersebut dapat mengurangi debit irigasi dan meningkatkan risiko kebakaran; karena itu, pengelola perlu memeriksa pasokan air serta menyiapkan patroli. Format ini membantu pembaca menghubungkan informasi ilmiah dengan keputusan. Pesan perlu diperbarui ketika prakiraan berubah. Jika lembaga mengubah tingkat risiko, alasan dan data baru perlu dijelaskan agar pembaruan tidak tampak seperti kontradiksi atau ketidakmampuan.

## 14 Agenda riset dan pembelajaran untuk Indonesia

Riset Indonesia perlu meningkatkan resolusi data dan pemahaman regional. Stasiun pengamatan yang terpelihara, data hujan, suhu, kelembapan tanah, debit, kebakaran, kualitas udara, hasil pertanian, dan kesehatan perlu diintegrasikan dengan metadata yang jelas. Data satelit membantu mengisi ruang yang tidak terjangkau stasiun, tetapi harus divalidasi di lapangan. Produk prakiraan perlu diuji retrospektif untuk mengetahui bias, keterampilan, dan nilai ekonominya bagi pengguna.

Agenda kedua ialah analisis interaksi. Pengaruh ENSO perlu dipelajari bersama IOD, monsun, Madden–Julian Oscillation, suhu lokal, kondisi tanah, dan perubahan penggunaan lahan. Dampak harus dibedakan menurut tipe El Niño dan kondisi ekosistem. Penelitian Pan et al. (2018) memberi ilustrasi bahwa sinyal ENSO saja tidak selalu cukup untuk menjelaskan kebakaran; fase IOD dan tipe ENSO mengubah intensitas. Kajian berikutnya dapat menguji dinamika tersebut untuk sektor pertanian, kesehatan, dan air dengan data lintas pulau.

Agenda ketiga adalah menghubungkan prakiraan dengan keputusan. Evaluasi tidak cukup berhenti pada skor model; perlu ditanya apakah petani mengubah kalender tanam, apakah rumah tangga menerima air, apakah tindakan pemadaman terjadi lebih awal, dan apakah kerugian turun. Penelitian implementasi dapat mengukur nilai ekonomi informasi iklim, keadilan distribusi peringatan, serta hambatan kelembagaan. Pengalaman pengguna harus menjadi bagian dari desain layanan iklim.

Dalam pendidikan manajemen, El Niño dapat digunakan sebagai studi kasus tentang keputusan di bawah ketidakpastian. Mahasiswa dapat diminta membandingkan respons pemerintah, perusahaan air, petani, rumah sakit, dan perusahaan logistik terhadap probabilitas kemarau. Analisis dapat memetakan pemangku kepentingan, skenario, ambang keputusan, biaya kegagalan, dan mekanisme akuntabilitas. Kasus ini menghubungkan manajemen risiko, operasi, strategi, keberlanjutan, komunikasi, dan etika distribusi. Pembelajaran semacam itu menempatkan data iklim sebagai input manajemen, bukan semata bahan ilmu alam.

Pendidikan publik perlu menjelaskan perbedaan antara prakiraan cuaca, prakiraan musim, dan proyeksi iklim. Prakiraan cuaca menjawab kondisi harian; prakiraan musim memberikan peluang untuk beberapa bulan; proyeksi iklim menggambarkan kondisi rata-rata dan risiko jangka panjang pada skenario emisi. Memahami perbedaan ini membantu pemerintah daerah merencanakan

tindakan jangka pendek maupun investasi jangka panjang tanpa mencampuradukkan skala waktu.

Riset juga perlu menilai hubungan antara risiko iklim dan tata kelola organisasi. Rumah sakit, universitas, pemerintah kota, perusahaan air, dan perusahaan pangan memiliki toleransi risiko serta kemampuan berbeda. Analisis dapat menelusuri bagaimana prakiraan masuk ke rapat anggaran, siapa yang berwenang mengubah operasi, bagaimana keputusan dicatat, dan apakah dampak pada kelompok rentan dievaluasi. Ini membuka ruang bagi pendekatan manajemen strategik, pembelajaran organisasi, tata kelola data, dan kepemimpinan adaptif. Studi kasus lintas provinsi dapat membandingkan wilayah yang sama-sama mengalami sinyal El Niño tetapi memiliki hasil berbeda karena kualitas institusi dan kesiapan yang tidak sama.

Keterbukaan data dapat meningkatkan kolaborasi ilmiah dan akuntabilitas. Penggunaan data iklim dan dampak sebaiknya disertai dokumentasi sumber, periode, resolusi, metode pembersihan, serta keterbatasan. Data lokal sering memiliki celah atau variasi kualitas, sehingga peneliti harus menghindari presisi palsu. Keterlibatan lembaga nasional dan daerah membantu menyepakati standar serta menambah legitimasi hasil. Sementara itu, model statistik dan kecerdasan buatan dapat memetakan pola risiko jika dilatih dengan data yang representatif dan divalidasi lintas wilayah. Sistem prediksi yang akurat di satu provinsi belum tentu akurat di provinsi lain. Evaluasi perlu menilai kesalahan dan dampak keputusan.

Ruang kolaborasi antardisiplin juga perlu diperkuat. Ahli atmosfer dapat menjelaskan peluang perubahan hujan; hidrolog memodelkan aliran dan simpanan; agronom menghubungkan air dengan fase tanaman; ahli kesehatan menilai paparan; ekonom dan ilmuwan sosial menganalisis harga, mata pencaharian, dan distribusi dampak. Kerja bersama mengurangi jarak antara hasil riset dan kebutuhan pelaksana. Mahasiswa dapat dilibatkan dalam pemetaan risiko, pengolahan data terbuka, atau evaluasi pesan peringatan

dengan etika dan supervisi yang memadai. Hasilnya bukan hanya publikasi akademik, tetapi juga kemampuan institusi untuk belajar dan memperbaiki keputusan secara berulang.

## 15 Sintesis variabilitas sebagai informasi dan perubahan sebagai risiko struktural

Hubungan El Niño dan perubahan iklim paling tepat dipahami melalui tiga lapis. Pertama, ENSO adalah proses alami yang memodulasi pola hujan dan suhu dari tahun ke tahun. Kedua, pemanasan global mengubah latar termal dan hidrologis sehingga dampak dari anomali dapat bergeser; ekstrem panas, hujan lebat, dan beberapa bentuk kekeringan telah menunjukkan pengaruh antropogenik yang kuat di berbagai wilayah. Ketiga, paparan, kerentanan, dan kapasitas kelembagaan menentukan apakah suatu kejadian menimbulkan kerusakan besar atau dapat ditangani.

Kepastian ilmiah paling tinggi menyangkut keberadaan ENSO sebagai mode variabilitas dominan dan tren pemanasan antropogenik. Bukti juga kuat bahwa ENSO memengaruhi risiko iklim regional, termasuk kekeringan dan banjir. Proyeksi bahwa hujan terkait ENSO akan makin bervariasi di dunia yang lebih hangat mendapat dukungan yang lebih konsisten daripada proyeksi perubahan amplitudo suhu laut ENSO. Di Indonesia, interaksi dengan IOD, monsun dan kondisi lokal membuat dampak berbeda antarwilayah. Oleh karena itu, pendekatan nasional perlu menggabungkan prakiraan global dengan diagnosis lokal.

Langkah praktisnya dimulai dari penerjemahan informasi. Indeks Niño 3.4 perlu disambungkan dengan prakiraan hujan zona musim, kelembapan tanah, aliran, risiko api, dan kebutuhan sektor. Pemerintah dan organisasi masyarakat perlu menentukan ambang tindakan sebelum krisis, mempersiapkan pembiayaan dan logistik, melindungi kelompok rentan, serta melakukan evaluasi setelah

kejadian. Pada saat yang sama, pengurangan emisi dan perlindungan ekosistem mengurangi tekanan jangka panjang.

Kerangka ini menempatkan ketidakpastian sebagai bagian dari keputusan, bukan sebagai alasan untuk menunda semua tindakan. Kebijakan yang baik memantau kondisi, menyediakan pilihan, menetapkan pemicu, dan menyesuaikan langkah ketika informasi baru datang. Dengan cara itu, pengalaman menghadapi satu El Niño memperkuat kapasitas menghadapi ENSO berikutnya dan perubahan iklim yang terus berlangsung.

Sistem pengelolaan adaptif menghubungkan pemantauan dengan aturan keputusan yang dapat disesuaikan. Pengelola waduk, misalnya, dapat menetapkan batas operasi berdasarkan prakiraan inflow dan permintaan, kemudian meninjau kembali aturan ketika pengamatan baru tersedia. Pemerintah daerah dapat menyiapkan pembiayaan awal untuk langkah yang berbiaya rendah, lalu mengaktifkan dukungan tambahan ketika indikator kekeringan dan dampak melampaui ambang. Setiap aturan harus memiliki penanggung jawab, sumber dana, jadwal tinjauan, dan mekanisme evaluasi. Dengan demikian, prakiraan tidak berhenti sebagai informasi, melainkan menjadi bagian dari sistem keputusan yang dapat belajar dari hasil.

Dalam kerangka pembangunan, keputusan infrastruktur perlu mempertimbangkan masa manfaat puluhan tahun. Bendungan, jalan, kawasan industri, dan sistem drainase akan beroperasi di bawah kondisi iklim yang berbeda dari masa desainnya. Standar berbasis data historis saja berisiko mengunci investasi pada asumsi masa lalu. Penggunaan beberapa skenario pemanasan, uji ketahanan sistem, dan opsi peningkatan bertahap dapat menurunkan risiko aset terlantar. Perencanaan menggabungkan proyeksi dengan kebutuhan layanan saat ini; tidak semua proyek harus menunggu kepastian tinggi. Yang penting, keputusan yang sulit dibalik harus diuji terhadap rentang masa depan yang luas dan mekanisme peninjauan disiapkan.

## 16 Kesimpulan

El Niño dan perubahan iklim adalah proses yang berbeda tetapi saling berinteraksi dalam sistem bumi yang sama. El Niño merupakan fase hangat ENSO yang muncul dari kopling laut–atmosfer di Pasifik tropis, sedangkan perubahan iklim antropogenik merupakan pergeseran jangka panjang yang terutama dipicu gas rumah kaca. El Niño memengaruhi distribusi hujan dan suhu antartahun; perubahan iklim menggeser keadaan dasar dan dapat memperbesar bahaya tertentu. Bukti tentang perubahan amplitudo suhu laut ENSO masa depan belum seragam, tetapi proyeksi peningkatan variabilitas hujan ENSO dalam iklim lebih hangat lebih konsisten.

Indonesia memerlukan pembacaan yang tidak menyederhanakan dampak. ENSO berinteraksi dengan IOD, monsun, topografi, kondisi lahan, dan tata kelola. Kekeringan dan kebakaran bukan akibat alam yang tak terhindarkan; pengelolaan gambut, pembukaan lahan, distribusi air, praktik pertanian, dan perlindungan sosial menentukan besarnya kerugian. Banjir juga tidak bergerak dalam arah yang sama di semua wilayah dan dapat muncul dari hujan, aliran sungai, pasang, serta subsiden yang berinteraksi.

Implikasi kebijakan utamanya ialah mengelola risiko berbasis informasi dan keadilan. Prakiraan musiman harus diterjemahkan menjadi peringatan dini berbasis dampak, prosedur tindakan antisipatif, investasi adaptasi yang tangguh, mitigasi emisi, dan perlindungan kelompok rentan. Riset serta pendidikan perlu menghubungkan data iklim dengan keputusan nyata. Dengan membedakan variabilitas alami, perubahan jangka panjang, dan faktor sosial yang membentuk bencana, Indonesia dapat menghindari penyederhanaan sebab sekaligus memperluas ruang tindakan yang efektif.

Pengalaman Indonesia dapat memperkaya pemahaman global karena negara kepulauan tropis ini menghadapi variasi hujan yang tajam, interaksi beberapa samudra, risiko kebakaran gambut, ketimpangan layanan, dan ketergantungan

banyak mata pencaharian pada kondisi musim. Satu pelajaran penting ialah bahwa kapasitas dasar—data yang terbuka, layanan publik yang kuat, pemeliharaan infrastruktur, dan partisipasi masyarakat—memberi perlindungan pada tahun ENSO netral sekaligus tahun ekstrem. Investasi pada kapasitas tersebut merupakan bentuk pengurangan risiko yang berkelanjutan. Penelitian lanjutan perlu menguji bukan hanya apakah ENSO berkorelasi dengan bahaya, tetapi bagaimana informasi iklim dapat mengubah keputusan dan menurunkan kerugian secara terukur.

Secara ilmiah, kesimpulan yang paling bertanggung jawab menjaga dua hal sekaligus: pengaruh ENSO tidak boleh dilebih-lebihkan sebagai penjelasan tunggal, dan perubahan iklim tidak boleh dikeluarkan dari analisis karena suatu peristiwa memiliki pemicu alami. Secara praktis, kebijakan yang baik bertumpu pada pemantauan, kesiapsiagaan, pengurangan kerentanan, serta pengurangan emisi. Masyarakat memperoleh manfaat ketika institusi mampu menjelaskan peluang dengan jujur dan memberi dukungan untuk bertindak. Dengan pemahaman tersebut, diskusi El Niño menjadi kesempatan memperkuat kemampuan Indonesia menghadapi variasi musim dan perubahan iklim yang berlangsung lebih panjang.

## Glossarium

**Atribusi iklim:** Analisis yang memperkirakan kontribusi faktor alami dan manusia terhadap perubahan peluang atau intensitas suatu kejadian iklim.

**Bahaya (hazard):** Proses atau kejadian fisik yang berpotensi menimbulkan dampak merugikan, seperti kekeringan, hujan ekstrem, atau panas.

**ENSO:** El Niño–Southern Oscillation; mode variabilitas laut–atmosfer di Pasifik tropis dengan fase El Niño, La Niña, dan netral.

**El Niño:** Fase hangat ENSO yang ditandai anomali pemanasan di Pasifik ekuatorial tengah dan/atau timur beserta respons atmosfernya.

**IOD:** Indian Ocean Dipole; variasi gradien suhu permukaan laut di Samudra Hindia tropis yang memengaruhi konveksi dan hujan regional.

**Kerentanan:** Kondisi sosial, ekonomi, fisik, atau ekologis yang meningkatkan kecenderungan unsur terpapar mengalami kerugian.

**La Niña:** Fase dingin ENSO, umumnya terkait pendinginan anomali di Pasifik ekuatorial tengah dan timur serta respons atmosfer terkait.

**Paparan:** Keberadaan penduduk, aset, layanan, mata pencaharian, atau ekosistem di tempat yang dapat terdampak bahaya.

**Perubahan iklim:** Perubahan statistik iklim yang berlangsung dalam jangka panjang dan dapat disebabkan faktor alami maupun antropogenik.

**Telekoneksi:** Hubungan jarak jauh antara anomali iklim di satu wilayah dengan pola cuaca atau iklim di wilayah lain melalui sirkulasi atmosfer-laut.

**Variabilitas iklim:** Fluktuasi keadaan iklim di sekitar rerata, pada skala musiman hingga antartahun atau lebih panjang.

**Risiko bencana:** Potensi kerugian yang terbentuk melalui interaksi bahaya dengan paparan, kerentanan, dan kapasitas.

**Kekeringan meteorologis:** Defisit curah hujan terhadap kondisi normal selama rentang waktu tertentu.

**Kekeringan hidrologis:** Defisit air pada aliran sungai, waduk, danau, atau air tanah setelah defisit hujan berlangsung.

**Kekeringan pertanian:** Kondisi ketika ketersediaan air tanah tidak mencukupi kebutuhan tanaman atau ternak.

**Peristiwa majemuk:** Kejadian ketika beberapa bahaya, pemicu, atau kondisi kerentanan terjadi bersamaan atau berurutan dan meningkatkan dampak.

**Peringatan dini berbasis dampak:** Informasi yang menghubungkan prakiraan bahaya dengan kemungkinan konsekuensi dan tindakan yang harus dilakukan.

**PM2.5:** Partikel udara dengan diameter aerodinamis sekitar 2,5 mikrometer atau lebih kecil yang dapat menembus jauh ke saluran pernapasan.

**Sirkulasi Walker:** Sirkulasi atmosfer timur–barat di wilayah tropis Pasifik yang berkaitan dengan konveksi, angin pasat, dan gradien suhu laut.

**Normal klimatologis:** Rata-rata atau statistik iklim untuk periode standar panjang, lazimnya 30 tahun, yang digunakan sebagai pembanding.

## Daftar Pustaka

Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., Timmermann, A., Santoso, A., McPhaden, M. J., Wu, L., England, M. H., Wang, G., Guilyardi, E., & Jin, F.-F. (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 4, 111–116. https://doi.org/10.1038/nclimate2100

Estrada, F., Perron, P., & Yamamoto, Y. (2025). Synergies between observed warming and ENSO episodes on extreme events. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1554(1), 95–109. https://doi.org/10.1111/nyas.70122

Field, R. D., van der Werf, G. R., Fanin, T., Fetzer, E. J., Fuller, R., Jien, S. H., Gaveau, D. L. A., Schumacher, C., & Smith, T. E. L. (2016). Indonesian fire activity and smoke pollution in 2015 show persistent nonlinear sensitivity to El Niño-induced drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(33), 9204–9209. https://doi.org/10.1073/pnas.1524888113

Floridi, A., Anda-León, M. D., Kozakiewicz, T., Bhattacharyya, M., Thota, A., Burt, P., Tasciotti, L., Selby, J., Premji, Z., & Shisler, S. (2025). Effects of El Niño and the positive Indian Ocean Dipole on health, food security, economics, and conflict in low- and middle-income countries in the Indo-Pacific: A systematic review. *Campbell Systematic Reviews*, 21(4), e70038. https://doi.org/10.1002/cl2.70038

Guimarães Nobre, G., Muis, S., Veldkamp, T. I. E., & Ward, P. J. (2019). Achieving the reduction of disaster risk by better predicting impacts of El Niño and La Niña. *Progress in Disaster Science*, 2, 100022. https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100022

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021a). *Climate change 2021: The physical science basis*. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021b). Summary for policymakers. In *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. In H.-O. Pörtner et al. (Eds.), Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

National Oceanic and Atmospheric Administration, Climate Prediction Center. (n.d.). ENSO FAQ. Retrieved October 22, 2026, from https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml

Pan, X., Chin, M., Ichoku, C. M., & Field, R. D. (2018). Connecting Indonesian fires and drought with the type of El Niño and phase of the Indian Ocean Dipole during 1979–2016. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(15), 7974–7988. https://doi.org/10.1029/2018JD028402

Siswanto, S., Wardani, K. K., Purbantoro, B., Rustanto, A., Zulkarnain, F., Anggraheni, E., Dewanti, R., Nurlambang, T., & Dimyati, M. (2022). Satellite-based meteorological drought indicator to support food security in Java Island. *PLOS ONE*, 17(6), e0260982. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260982

Setiawan, A. M., Lee, W.-S., & Rhee, J. (2017). Spatio-temporal characteristics of Indonesian drought related to El Niño events and its predictability using the multi-model ensemble. *International Journal of Climatology*, 37(13), 4700–4713. https://doi.org/10.1002/joc.5117

Ward, P. J., Jongman, B., Kummu, M., Dettinger, M. D., Sperna Weiland, F. C., & Winsemius, H. C. (2014). Strong influence of El Niño Southern Oscillation on flood risk around the world. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(44), 15659–15664. https://doi.org/10.1073/pnas.1409822111

World Meteorological Organization. (2025). *State of the global climate 2024* (WMO-No. 1368). https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024

World Meteorological Organization. (n.d.). El Niño/La Niña phenomena. Retrieved October 22, 2026, from https://wmo.int/themes/el-nino-la-nina-phenomena

Yun, K.-S., Lee, J.-Y., Timmermann, A., Stein, K., Stuecker, M. F., Fyfe, J. C., & Chung, E.-S. (2021). Increasing ENSO–rainfall variability due to changes in future tropical temperature–rainfall relationship. *Communications Earth & Environment*, 2, 43. https://doi.org/10.1038/s43247-021-00108-8

D'Arrigo, R., & Wilson, R. (2008). Tropical climate influences on drought variability over Java, Indonesia. Geophysical Research Letters, 35(5), L05707. https://doi.org/10.1029/2007GL032589