
KEBAKARAN HUTAN, EMISI KARBON,
DAN PERCEPATAN PERUBAHAN IKLIM
Dari kerusakan ekosistem menuju umpan balik iklim
HUTAN SEHAT IKLIM LEBIH AMAN
1 SUMBER KARBON
Biomassa terbakar
Gambut mengering dan membara
Deforestasi mengurangi penyerap karbon
EMISI KE ATMOSFER
CO2 Karbon dioksida
CH4 Metana
Black carbon
Asap dan aerosol
2 UMPAN BALIK IKLIM
Api melepaskan CO2 dan gas lain
Panas dan kekeringan meningkatkan risiko
Kebakaran berulang melemahkan pemulihan
PEMANASAN GLOBAL
Suhu lebih tinggi dan kondisi lebih kering
HUTAN DAN GAMBUT
Meningkatkan risiko kebakaran (tergantung kondisi ekosistem)
3 DAMPAK
Pemanasan global
Asap dan PM2.5 mengancam kesehatan
Biodiversitas dan fungsi hutan menurun
4 LANGKAH MITIGASI
Lindungi hutan alami
Jaga muka air gambut
Cegah kebakaran sebelum musim kering
Dukung praktik tanpa bakar
Kurangi emisi bahan bakar fosil
Mengurangi emisi dan memperkuat penyerap karbon
RESTORASI HUTAN DAN GAMBUT
Menyerap karbon, memulihkan fungsi ekosistem, meningkatkan ketahanan iklim
Pencegahan
Perlindungan karbon
Pemulihan ekosistem
Ketahanan iklim
CEGAH API • PERTAHANKAN PENYERAP KARBON • PULIHKAN EKOSISTEM
Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD
Guru Besar Manajemen dan AI Data Analyst
IBM-ASMI | RudyCT Academic Series
www.rudyct.com/cv.pdf
ILMU UNTUK HUTAN DAN MASA DEPAN

Kebakaran Hutan, Emisi Karbon, dan Percepatan Perubahan Iklim

Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD

www.rudyct.com/cv.pdf

IBM-ASMI* | *RudyCT Academic Series

Abstract

Kebakaran hutan dan lahan menghubungkan perubahan tutupan bumi dengan perubahan iklim melalui pelepasan karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitrogen oksida (N_2O), karbon hitam, dan aerosol lainnya; hilangnya biomassa; serta melemahnya kemampuan ekosistem menyerap karbon. Namun, hubungan tersebut tidak seragam. Kebakaran alami yang diikuti regenerasi dapat menjadi bagian dari dinamika ekosistem, sedangkan kebakaran berulang, deforestasi, pengeringan gambut, dan pembakaran lahan dapat mengubah ekosistem menjadi sumber emisi jangka panjang. Artikel ini menelaah mekanisme emisi dan umpan balik iklim, dampak kebakaran tropis dan gambut, ketidakpastian pengukuran, dimensi sosial-ekonomi, serta kebijakan mitigasi dan adaptasi. Tinjauan naratif mengacu pada laporan IPCC, Global Carbon Budget, dan penelitian ilmiah yang ditelaah sejawat, termasuk temuan terbaru mengenai besarnya ketidakpastian fluks karbon lahan. Argumen utama artikel adalah bahwa pengurangan kebakaran berisiko tinggi merupakan strategi iklim yang penting, tetapi tidak dapat menggantikan pengurangan emisi bahan bakar fosil. Kebijakan yang efektif harus memadukan pencegahan kebakaran,

perlindungan dan pemulihan gambut, pengelolaan hutan yang sesuai ekologi, penegakan hukum yang adil, alternatif mata pencaharian, pengukuran karbon yang transparan, dan pembiayaan jangka panjang. Keberhasilan perlu diukur melalui emisi bersih, kondisi ekosistem, risiko kebakaran, dan kesejahteraan masyarakat, bukan hanya jumlah hotspot atau luas terbakar.

Kata Kunci: kebakaran hutan; emisi karbon; perubahan iklim; gambut; deforestasi; umpan balik iklim; mitigasi; Indonesia

1. Pendahuluan

Kebakaran hutan kerap dibayangkan sebagai peristiwa lokal: api menghanguskan vegetasi, asap memenuhi langit, dan petugas berusaha memadamkan bara. Dalam konteks perubahan iklim, kebakaran memiliki arti yang lebih luas. Api memindahkan karbon yang tersimpan dalam pohon, seresah, akar, tanah organik, dan gambut ke atmosfer. Kebakaran juga mengubah kemampuan lahan menyerap karbon pada masa depan. Bila hutan tumbuh kembali dengan baik, sebagian karbon dapat diserap kembali; bila pembakaran berulang menghambat regenerasi atau mengubah hutan menjadi penggunaan lahan lain, sebagian emisi dapat bertahan lama dalam sistem iklim.

Hubungan antara kebakaran dan iklim bekerja dua arah. Kondisi panas dan kering dapat meningkatkan bahaya kebakaran di banyak wilayah, meski responsnya bergantung pada jenis vegetasi, kelembapan bahan bakar, topografi, angin, dan aktivitas manusia. Sebaliknya, kebakaran menambah gas rumah kaca dan dapat mengurangi cadangan karbon ekosistem. Hubungan dua arah ini dikenal sebagai umpan balik iklim. Umpan balik tidak berarti bahwa setiap kebakaran pasti mempercepat pemanasan dengan besaran yang sama; skala, jenis ekosistem, intensitas, frekuensi, dan pemulihan menentukan hasil akhirnya.

Pembahasan karbon kebakaran harus membedakan beberapa hal yang sering dicampuradukkan: emisi bruto dari pembakaran, perubahan bersih stok karbon setelah pertumbuhan kembali, emisi akibat perubahan penggunaan lahan, dan emisi antropogenik yang menjadi dasar inventaris nasional. Estimasi emisi api berbasis satelit biasanya menunjukkan fluks karbon bruto yang dilepaskan oleh kebakaran yang terdeteksi. Neraca karbon lahan memperhitungkan pula penyerapan pascakebakaran dan perubahan tutupan lahan. Karena itu, angka emisi api tidak boleh begitu saja ditambahkan atau dibandingkan dengan angka emisi bersih perubahan penggunaan lahan tanpa memahami batas akuntansinya (Friedlingstein et al., 2026).

Artikel ini mengembangkan penjelasan naratif untuk pembaca akademik dan praktisi. Tujuannya ialah menerangkan mekanisme ilmiah, menilai tingkat kepastian bukti, dan merumuskan pilihan manajemen yang dapat diterapkan dalam konteks Indonesia maupun global. Uraian dimulai dari siklus karbon dan proses pembakaran, lalu beralih pada hutan tropis, gambut, dan contoh kebakaran besar. Bagian berikutnya membahas pengukuran, umpan balik, dampak sosial, serta kebijakan pencegahan, restorasi, tata kelola perusahaan dan pembiayaan.

Tesis utama artikel ini adalah bahwa mencegah kebakaran yang merusak ekosistem berkarbon tinggi merupakan langkah penting untuk menghindari emisi dan mempertahankan daya serap alam. Akan tetapi, perlindungan hutan dan gambut harus berjalan bersama pengurangan emisi dari energi, transportasi, industri, dan sektor lainnya. Strategi iklim yang hanya bergantung pada penyerapan karbon hutan, tanpa mengurangi emisi fosil, akan membebani ekosistem dan masyarakat secara tidak realistis.

2. Pendekatan tinjauan dan batas pembahasan

Naskah ini menggunakan tinjauan naratif atas laporan penilaian ilmiah, publikasi neraca karbon global, penelitian emisi kebakaran, kajian gambut

tropis, serta literatur mengenai perubahan iklim dan pemulihan ekosistem. Tinjauan ini tidak dimaksudkan sebagai meta-analisis yang menghitung satu estimasi gabungan dari seluruh penelitian. Hasil dari berbagai wilayah dan metode digunakan untuk menjelaskan mekanisme dan variasi, bukan dianggap langsung dapat dipertukarkan.

Kebakaran merupakan kategori yang beragam. Ada api yang timbul dalam ekosistem yang secara historis beradaptasi dengan kebakaran, kebakaran yang dipicu aktivitas manusia, api untuk pembukaan lahan, pembakaran lahan pertanian, kebakaran bawah permukaan pada gambut, serta kebakaran ekstrem yang didorong kombinasi cuaca, bahan bakar dan tata guna lahan. Sebagian kebakaran membakar tumbuhan hidup dan sebagian lain terutama mengonsumsi seresah atau bahan organik tanah. Perbedaan tersebut menghasilkan rasio gas dan karbon yang berbeda.

Keterbatasan lain muncul dari resolusi pengamatan. Satelit dapat mendeteksi area terbakar, radiasi api, temperatur anomali dan perubahan tutupan, tetapi setiap sensor memiliki ambang deteksi, cakupan awan, periode lintasan dan ketelitian spasial tertentu. Kebakaran kecil, api membara di bawah permukaan, atau kebakaran yang berlangsung singkat dapat terlewat. Estimasi emisi kemudian bergantung pada model biomassa, fraksi karbon, kelengkapan pembakaran dan faktor emisi untuk setiap gas.

Karena bukti dan metode terus diperbarui, angka global dalam artikel ini diperlakukan sebagai estimasi beserta batasannya, bukan sebagai kepastian tunggal. Edisi Global Carbon Budget terbaru yang digunakan adalah edisi 2025 yang terbit pada 2026, sedangkan penilaian proses iklim merujuk pada IPCC AR6. Perbandingan angka antar edisi harus melihat periode, definisi, dan metode yang digunakan.

3. Siklus karbon dan arti emisi kebakaran

Karbon bergerak di antara atmosfer, biosfer, tanah, laut dan batuan melalui proses yang memiliki kecepatan berbeda. Tumbuhan menyerap CO_2 melalui fotosintesis, menyimpannya di jaringan dan memasukkan sebagian ke tanah melalui akar dan seresah. Respirasi tumbuhan, mikroba, dekomposisi, kebakaran, panen dan perubahan penggunaan lahan melepaskan sebagian karbon tersebut. Hutan yang sehat dapat bertindak sebagai penyerap bersih dalam periode tertentu, tetapi bukan tempat penyimpanan yang permanen tanpa pengelolaan dan kondisi ekologis yang mendukung.

Pembakaran biomassa mengubah sebagian karbon organik menjadi CO_2 dan karbon monoksida (CO), serta menghasilkan CH_4, senyawa organik volatil, partikel, dan gas lain. Produk pembakaran dipengaruhi oleh kadar air, komposisi bahan bakar, suhu dan ketersediaan oksigen. Pembakaran yang lebih sempurna umumnya menghasilkan proporsi CO_2 lebih tinggi, sedangkan pembakaran membara pada bahan yang lembap dapat meningkatkan produk tidak teroksidasi, termasuk CO dan sejumlah polutan iklim jangka pendek. Karena itu, satu faktor emisi tidak cocok untuk semua tipe api.

Emisi karbon dari kebakaran dapat dilaporkan sebagai karbon elemental, CO_2, atau CO_2 ekuivalen. Satu ton karbon setara secara massa dengan 3,667 ton CO_2 bila seluruh karbon teroksidasi menjadi CO_2. Namun, karbon yang keluar sebagai CH_4 memiliki dampak pemanasan per satuan massa dan jangka waktu berbeda dari CO_2. Konversi ke CO_2e memerlukan metrik dan horizon waktu tertentu, misalnya Global Warming Potential selama 100 tahun. Laporan harus menyebut unit dan metrik agar angka tidak disalahartikan.

Konsep emisi bruto dan bersih sangat penting dalam menilai kebakaran. Emisi bruto mengukur karbon yang dilepaskan pada waktu api terjadi. Fluks bersih dapat memasukkan penyerapan kembali oleh vegetasi yang tumbuh setelah kebakaran, kehilangan karbon melalui dekomposisi, serta perubahan stok

tanah dan biomassa. Bila hutan pulih, sebagian emisi dapat diserap dalam beberapa dekade, tetapi penyerapan kembali tidak membatalkan dampak iklim yang terjadi selama karbon berada di atmosfer. Jika regenerasi gagal atau lahan dialihkan menjadi perkebunan, stok karbon dapat turun secara permanen atau dalam rentang waktu panjang.

Neraca global harus menghindari penghitungan ganda. Inventaris emisi kebakaran dari satelit memasukkan berbagai tipe api, termasuk kebakaran yang bagian dari siklus alami, kebakaran yang dipengaruhi perubahan iklim dan kebakaran terkait penggunaan lahan. Sebaliknya, kategori perubahan penggunaan lahan dalam neraca karbon berupaya mengukur perubahan bersih akibat deforestasi, degradasi, pertumbuhan kembali dan praktik pengelolaan. Peneliti menekankan bahwa emisi api adalah fluks bruto, sedangkan fluks lahan dalam neraca karbon bersifat bersih dan harus mempertimbangkan pemulihan pascakebakaran (Friedlingstein et al., 2026).

4. Proses fisik kebakaran dan faktor pengendali

Api memerlukan bahan bakar, oksigen dan sumber panas. Bahan bakar dapat berupa daun kering, ranting, batang, seresah, akar, rumput, semak, kayu mati atau bahan organik gambut. Ketersediaan bahan bakar ditentukan oleh vegetasi dan sejarah pengelolaan, sedangkan kadar airnya dipengaruhi hujan, suhu, kelembapan, naungan dan kondisi tanah. Api dapat menyebar secara permukaan, melompat melalui tajuk, atau membara di tanah organik. Setiap pola memerlukan teknik deteksi dan pemadaman yang berbeda.

Cuaca kebakaran merupakan kombinasi kondisi yang memudahkan penyalaan dan penyebaran, seperti suhu tinggi, kelembapan rendah, angin kencang dan kekeringan berkepanjangan. Indeks bahaya kebakaran merangkum beberapa variabel meteorologis, namun tidak menggantikan pengamatan lapangan dan pengetahuan lokal. Dua lokasi dengan indeks serupa dapat memiliki risiko

berbeda bila satu memiliki gambut kering dan jaringan kanal, sedangkan lokasi lain memiliki bahan bakar lembap dan akses pemadaman yang baik.

Perubahan iklim dapat menggeser musim kebakaran, memperpanjang periode kering atau meningkatkan intensitas gelombang panas di sejumlah wilayah. Tetapi pengaruhnya bergantung pada biomassa yang tersedia. Kekeringan ekstrem di hutan yang telah terfragmentasi dan kaya bahan bakar kering dapat meningkatkan risiko lebih tajam daripada di lanskap dengan tutupan dan kelembapan yang lebih utuh. IPCC menilai bahwa perubahan iklim semakin memengaruhi rezim kebakaran bersamaan dengan aktivitas manusia, dan variabilitas iklim masa depan dapat meningkatkan kejadian kebakaran di sejumlah bioma (IPCC, 2021, 2019).

Aktivitas manusia memengaruhi baik sumber penyalaan maupun lanskap. Pembukaan lahan, pembakaran sisa tanaman, pembuatan jalan, drainase, penebangan dan fragmentasi dapat mengubah bahan bakar dan kelembapan. Kebakaran yang bermula dari praktik terkendali dapat menjadi tidak terkendali saat kondisi kering, pengawasan lemah atau api menyebar ke tanah organik. Karena itu, kebijakan tidak cukup menargetkan “api” secara abstrak; ia harus memahami sumber penyalaan, insentif ekonomi, akses lahan dan kapasitas pengelolaan.

Kebakaran juga menciptakan kondisi baru bagi kebakaran berikutnya. Api dapat membuka kanopi, mengeringkan mikroklimat, membunuh pohon besar dan menghasilkan bahan bakar mati. Sebaliknya, kebakaran berulang juga dapat mengurangi biomassa yang tersedia sehingga emisi kebakaran berikutnya tidak selalu meningkat secara linear. Dampak akhir ditentukan oleh interaksi antara intensitas api, musim, pola pemulihan dan perubahan tata guna lahan setelah kebakaran.

5. Hutan tropis dan cadangan karbon

Hutan tropis menyimpan karbon dalam biomassa di atas tanah, akar, kayu mati, seresah dan tanah. Kandungan karbon berbeda menurut tipe hutan, curah hujan, ketinggian, komposisi spesies, kondisi hidrologi dan tingkat gangguan. Hutan tua memiliki struktur vertikal kompleks dan menyimpan stok karbon yang berkembang selama periode panjang. Penghilangan hutan untuk produksi lahan dapat melepaskan sebagian besar simpanan tersebut sekaligus mengurangi kemampuan menyerap karbon di masa depan.

Kebakaran di hutan tropis lembap sering kali bukan proses ekologis yang dominan dalam kondisi alami sebagaimana pada beberapa ekosistem savana atau hutan boreal. Ketika hutan lembap mengalami pembalakan, fragmentasi, kekeringan atau pembukaan lahan, kondisi mikroklimat dapat berubah dan membuatnya lebih mudah terbakar. Api kemudian dapat mematikan pohon, merusak benih dan mengubah komposisi spesies. Perubahan ekologis tersebut dapat menurunkan ketahanan hutan terhadap kekeringan dan kebakaran berikutnya.

Kebakaran berulang dapat menggeser hutan menjadi semak atau padang rumput yang lebih mudah terbakar. Dalam keadaan seperti itu, regenerasi tidak otomatis mengembalikan karbon ke tingkat semula. Semak dapat memiliki stok biomassa yang lebih rendah, sedangkan erosi dan degradasi tanah mengurangi produktivitas. Bila lahan kemudian digunakan secara intensif, tekanan regenerasi meningkat. Pemulihan ekosistem harus memperhitungkan kemampuan alami hutan untuk pulih dan hambatan yang diciptakan manusia.

Perlindungan hutan berkarbon tinggi juga memberi manfaat yang tidak tertangkap oleh tonase CO_2 semata. Hutan mengatur aliran air, melindungi tanah, menjadi habitat keanekaragaman hayati, menyediakan pangan dan bahan bagi masyarakat lokal, serta menjaga nilai budaya. Kebijakan iklim yang

hanya menghitung karbon dapat mendorong monokultur pohon yang cepat tumbuh tetapi kurang mendukung biodiversitas dan ketahanan masyarakat. Pengukuran perlu menggabungkan karbon dengan indikator ekologis dan sosial.

Penting membedakan kebakaran sebagai sumber emisi dan deforestasi sebagai perubahan stok karbon. Kebakaran dapat menjadi bagian dari proses deforestasi, tetapi tidak semua kehilangan hutan terjadi melalui api. Penebangan tanpa pembakaran juga mengurangi stok karbon dan dapat membuka lahan bagi kebakaran selanjutnya. Strategi mitigasi harus mengurangi pendorong hilangnya hutan secara menyeluruh, termasuk tata kelola izin, permintaan komoditas, konflik tenurial dan lemahnya pengawasan.

6. Gambut tropis: penyimpanan karbon dan kerentanan api

Lahan gambut terbentuk ketika sisa tumbuhan terakumulasi dalam kondisi jenuh air dan dekomposisi berlangsung lambat. Dalam jangka panjang, lapisan organik dapat menyimpan karbon dalam jumlah besar per satuan luas. Gambut tropis memiliki fungsi hidrologi, ekologis dan sosial penting, tetapi sensitif terhadap perubahan muka air. Ketika kanal mengeringkan lahan untuk produksi, lapisan gambut terpapar oksigen, terdekomposisi dan melepaskan CO_2 bahkan tanpa kebakaran.

Kekeringan dan drainase dapat membuat gambut mudah terbakar. Api pada gambut sering membara di bawah permukaan, bergerak perlahan dan sulit dipadamkan dengan metode yang efektif untuk api permukaan. Pembakaran tanah organik dapat mengonsumsi bahan bakar jauh lebih besar daripada yang tampak dari tajuk yang terbakar. Kedalaman pembakaran, kerapatan, kelembapan, tingkat dekomposisi dan sejarah api memengaruhi karbon yang dilepaskan.

Emisi kebakaran gambut meliputi CO_2 dan gas lain. Studi pengukuran lapangan di Sumatra dan Kalimantan menunjukkan bahwa faktor emisi kebakaran gambut memiliki variasi yang penting, dan komposisi emisi dipengaruhi lokasi serta kondisi pembakaran (Stockwell et al., 2022). Penelitian tersebut meningkatkan basis data untuk memperkirakan emisi, tetapi tetap menegaskan kebutuhan pengukuran lintas tipe gambut, kondisi hidrologis dan sejarah kebakaran.

Indonesia telah mengembangkan inventaris faktor emisi khusus bagi lahan gambut dan mangrove. Kajian yang diterbitkan di PNAS membahas perlunya penyempurnaan faktor emisi untuk meningkatkan akurasi target iklim dan inventaris nasional, serta menyatakan bahwa emisi kebakaran gambut dipengaruhi oleh luas area terbakar, massa gambut yang terbakar dan faktor emisi gas (Murdiyarso et al., 2024). Peningkatan ketelitian inventaris tidak hanya urusan teknis; ia menentukan penetapan prioritas restorasi, pelaporan dan penilaian kemajuan.

Kebakaran gambut 2015 menunjukkan betapa besar emisi dapat dilepaskan dalam satu musim ekstrem. Berbagai estimasi ilmiah berbeda karena metode, batas wilayah, jenis bahan bakar, faktor emisi dan asumsi kedalaman pembakaran. Oleh karena itu, angka spesifik untuk tahun kejadian perlu disertai sumber dan metode. Kesimpulan yang kuat adalah bahwa kebakaran gambut tropis dapat menjadi sumber karbon dan polutan yang sangat besar, dan pencegahan melalui pemeliharaan hidrologi jauh lebih efisien daripada mengandalkan pemadaman setelah kebakaran meluas.

Pengelolaan gambut berkelanjutan mencakup perlindungan kubah gambut, pengendalian drainase, pembasahan kembali, penutupan atau pengaturan kanal yang sesuai, restorasi vegetasi dan pengembangan mata pencaharian yang tidak mengharuskan pengeringan. Intervensi hidrologis perlu disusun pada skala kesatuan hidrologis, bukan hanya petak individual, karena air

bergerak lintas batas lahan dan administrasi. Masyarakat lokal harus dilibatkan agar pemulihan tidak menimbulkan banjir, konflik lahan atau hilangnya sumber penghasilan.

7. Dari kebakaran menuju pemanasan: mekanisme iklim

CO_2 yang dilepaskan oleh pembakaran menambah konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer dan meningkatkan penahanan energi. Sebagian karbon dapat diserap kembali oleh vegetasi yang tumbuh, tetapi karbon di atmosfer memengaruhi iklim selama waktu yang panjang. Bila kebakaran berulang menyebabkan ekosistem menjadi sumber bersih, kontribusi terhadap pemanasan menjadi berkelanjutan. Dampak iklim tidak semata ditentukan oleh emisi satu kejadian, tetapi oleh akumulasi emisi lintas tahun dan respons sistem bumi.

CH_4 memiliki umur atmosfer lebih pendek daripada CO_2 tetapi potensi pemanasan lebih tinggi dalam jangka waktu tertentu. Kebakaran juga menghasilkan CO yang bereaksi dalam atmosfer dan memengaruhi umur metana serta pembentukan ozon troposfer. Karbon hitam pada aerosol dapat menyerap radiasi matahari dan mengendap pada salju atau es, sedangkan beberapa aerosol lain dapat memantulkan radiasi dan mendinginkan sementara. Campuran asap karenanya memiliki efek iklim yang kompleks dan tidak dapat diringkas menjadi satu arah untuk semua komponen.

Perubahan tutupan hutan mengubah albedo, evapotranspirasi, kekasaran permukaan dan sirkulasi kelembapan. Di beberapa wilayah tropis, hutan melepaskan uap air yang berkontribusi pada pembentukan hujan lokal dan regional. Hilangnya hutan dapat mengurangi daur ulang kelembapan, mengubah kondisi mikroklimat dan meningkatkan kekeringan. Efek biogeofisik ini melengkapi emisi gas rumah kaca dan dapat memperburuk risiko kebakaran di sebagian lanskap.

Umpan balik positif terjadi ketika pemanasan meningkatkan risiko kondisi kebakaran, kebakaran menambah emisi dan melemahkan penyerap karbon, kemudian konsentrasi gas rumah kaca meningkat. Namun, kekuatan umpan balik berbeda antarbioma. Di hutan boreal, perubahan salju dan albedo setelah kebakaran mungkin berperan; di gambut tropis, hilangnya karbon tanah organik dan drainase sangat penting; di savana, kebakaran dapat menjadi proses ekologi yang khas dan dipengaruhi oleh pengelolaan bahan bakar. Menggunakan satu model konseptual untuk semua wilayah berisiko menyesatkan.

Umpan balik negatif juga mungkin terjadi. Pertumbuhan kembali menyerap karbon, perubahan tutupan vegetasi dapat mengurangi ketersediaan bahan bakar, dan beberapa kebakaran dapat menurunkan intensitas pembakaran pada tahun berikutnya dengan menghabiskan bahan bakar. Akan tetapi, proses pemulihan bisa lambat atau terhambat oleh kekeringan, kebakaran berulang, invasi spesies, penggembalaan dan konversi lahan. Kajian karbon terestrial menekankan bahwa kehilangan dan pemulihan setelah kebakaran mencakup proses di atas dan di bawah tanah yang beragam (Walker et al., 2023).

Karena itu, istilah “percepatan perubahan iklim” dalam artikel ini berarti bahwa kebakaran dapat memperkuat pemanasan melalui emisi dan pelemahan penyerap karbon pada konteks tertentu, bukan klaim bahwa setiap kebakaran merupakan penyebab dominan pemanasan global. Pembakaran bahan bakar fosil tetap merupakan pendorong utama perubahan iklim antropogenik jangka panjang. Penanganan kebakaran adalah bagian dari strategi iklim yang penting, tetapi harus dilihat bersama transisi energi dan penghentian deforestasi.

8. Variabilitas iklim, El Niño, dan risiko kebakaran

El Niño–Southern Oscillation (ENSO) mengubah pola suhu permukaan laut dan sirkulasi atmosfer di kawasan tropis. Pada fase El Niño, beberapa wilayah Indonesia cenderung mengalami musim kering lebih panjang atau curah hujan di bawah normal, meskipun dampaknya bervariasi menurut tempat dan musim. Indian Ocean Dipole juga dapat memengaruhi curah hujan di Indonesia, terkadang memperkuat kondisi kering. Kombinasi anomali iklim dapat memperbesar bahaya api bila lanskap telah dikeringkan dan bahan bakar tersedia.

Penting membedakan variabilitas iklim alami dari tren pemanasan antropogenik. ENSO adalah fenomena berulang dengan perubahan antar tahun. Perubahan iklim menggeser kondisi latar belakang suhu, kelembapan, dan potensi ekstrem. Kedua proses dapat terjadi bersamaan. Saat anomali alami memicu kekeringan pada iklim yang lebih hangat, penguapan yang lebih tinggi dapat mempercepat pengeringan vegetasi atau tanah. Namun, atribusi suatu tahun kebakaran tertentu memerlukan analisis khusus, bukan kesimpulan sederhana dari satu indeks iklim.

Risiko kebakaran terbentuk dari bahaya, paparan dan kerentanan. Bahaya mencakup kondisi cuaca dan bahan bakar; paparan mencakup penduduk, aset, karbon dan ekosistem yang berada di jalur api; kerentanan mencakup kapasitas mencegah, melindungi dan pulih. Kebijakan yang hanya memantau curah hujan mengukur sebagian bahaya, tetapi kurang menangkap kondisi sosial dan tata guna lahan. Peta risiko berguna ketika menggabungkan faktor-faktor ini untuk menetapkan prioritas pencegahan.

Prakiraan musiman dapat memberi waktu bagi pemerintah dan masyarakat untuk membersihkan kanal yang bermasalah, mempertahankan muka air, memeriksa peralatan, mengatur patroli dan menginformasikan risiko. Namun, prakiraan bukan kepastian. Rencana harus memiliki skenario berbeda dan

ambang tindakan yang fleksibel. Ketika data baru menunjukkan musim kering mungkin lebih ringan, kesiagaan dapat disesuaikan tanpa membatalkan pemeliharaan dasar yang bermanfaat sepanjang tahun.

Dalam konteks perubahan iklim, strategi jangka panjang juga perlu menggunakan skenario iklim dan tata guna lahan. Model perlu memasukkan kemungkinan perubahan jenis vegetasi, kekeringan, fragmentasi dan kebijakan perlindungan. Ketidakpastian proyeksi bukan alasan untuk menunda pencegahan yang memberi manfaat di banyak skenario, seperti melindungi hutan utuh dan menjaga kelembapan gambut. Pendekatan ini dikenal sebagai kebijakan tanpa penyesalan atau no-regret measures.

9. Dampak kebakaran pada atmosfer, kualitas udara, dan kesehatan

Kebakaran menghasilkan campuran gas dan partikel yang memengaruhi kualitas udara lokal, regional dan global. PM2.5 dapat masuk jauh ke saluran pernapasan, sementara ozon troposfer dapat terbentuk melalui reaksi fotokimia gas prekursor. Asap juga mengandung senyawa organik dan karbon hitam. Komposisinya dipengaruhi bahan bakar, kelembapan dan kondisi pembakaran. Paparan manusia ditentukan pula oleh jarak, arah angin, tinggi plume, durasi episode, ventilasi bangunan dan perilaku perlindungan.

Polusi udara dari kebakaran meningkatkan risiko kesehatan akut, terutama bagi anak, lansia, ibu hamil, penderita penyakit pernapasan atau kardiovaskular, serta pekerja luar ruang. Paparan dapat menyebabkan iritasi mata dan saluran napas, memperburuk asma, dan meningkatkan beban fasilitas kesehatan. Dampak jangka panjang dan atribusi penyakit tertentu memerlukan data epidemiologi yang memadai. Ketidakpastian mengenai jumlah pasti kasus tidak boleh diartikan bahwa paparan aman; kebijakan kesehatan masyarakat harus berpegang pada prinsip pencegahan.

Karbon hitam dan aerosol memiliki masa tinggal atmosfer lebih pendek dibanding CO_2, tetapi dapat memengaruhi keseimbangan energi dan kesehatan dalam jangka dekat. Mengurangi pembakaran terbuka dapat memberikan manfaat ganda: menekan emisi iklim jangka pendek dan mengurangi paparan partikel. Namun, pendekatan pengurangan aerosol perlu mempertimbangkan semua polutan dan tidak boleh digunakan sebagai pengganti pengurangan CO_2 fosil yang menahan pemanasan dalam jangka panjang.

Asap kebakaran tidak hanya mengganggu kesehatan. Penerbangan, pelayaran, sekolah, pariwisata, pertanian dan produktivitas kerja dapat terdampak. Ketika kabut asap melintasi batas negara, biaya ekonomi dan kesehatan terdistribusi lintas yurisdiksi. Hal tersebut memperkuat alasan untuk berbagi data dan koordinasi, sekaligus menunjukkan bahwa pencegahan di sumber sering lebih efisien daripada menanggung biaya perlindungan dan pemulihan setelah episode berlangsung.

Rencana kesehatan perlu memiliki sistem peringatan, ruang udara bersih, kesiapan obat, pelindung pernapasan yang sesuai, panduan aktivitas dan dukungan bagi pekerja yang tidak dapat menghindari paparan. Sekolah dan puskesmas memerlukan protokol yang mudah dijalankan. Perlindungan tersebut adalah langkah adaptasi; ia tidak menggantikan pengurangan api dan emisi. Pendekatan terbaik menggabungkan pengurangan emisi dengan kesiapsiagaan agar masyarakat tidak hanya diminta beradaptasi terhadap risiko yang sebenarnya dapat dicegah.

10. Ketidakpastian pengukuran dan neraca karbon

Mengestimasi emisi kebakaran memerlukan beberapa komponen: luas area terbakar, jumlah bahan bakar yang tersedia, fraksi yang benar-benar terbakar, kandungan karbon, dan faktor emisi untuk setiap gas. Kesalahan pada salah satu komponen dapat memengaruhi estimasi total. Inventaris global

menggunakan kombinasi data satelit, pengukuran lapangan, model biomassa dan faktor emisi. Inventaris nasional dapat memakai metodologi bertingkat sesuai pedoman IPCC, dengan data lokal yang lebih rinci bila tersedia.

Kebakaran bawah permukaan gambut menimbulkan tantangan khusus karena luas api tidak selalu terlihat dari atas. Kedalaman pembakaran dan massa gambut yang hilang dapat sulit diukur sesudah api padam. Emisi karbon dari kebakaran gambut dihitung melalui luas terbakar dan faktor emisi yang mencerminkan kedalaman, kerapatan dan komposisi gambut. Pengukuran lapangan memperbaiki estimasi, tetapi keterwakilan lokasi tetap menjadi pertanyaan karena kondisi gambut beragam.

Global Carbon Budget 2025 memperkirakan emisi antropogenik CO_2 total pada 2024 sebesar 42,4 ± 3,2 $GtCO_2$ per tahun, dengan emisi bahan bakar fosil dan perubahan penggunaan lahan sebagai komponen yang dilaporkan terpisah. Publikasi itu menegaskan bahwa ketidakpastian emisi perubahan penggunaan lahan tetap besar, dan kesepakatan antar metode dalam menggambarkan variasi fluks karbon lahan masih terbatas (Friedlingstein et al., 2026). Angka tersebut bukan estimasi emisi kebakaran saja, dan tidak boleh dipakai sebagai padanan emisi kebakaran global.

Penelitian mengenai neraca karbon 2024 juga melaporkan bahwa kebakaran global meningkat dibanding rata-rata 2015–2022 dan ikut menjelaskan penurunan penyerap karbon lahan pada tahun tersebut, sementara variasi iklim dan kondisi regional berkontribusi (Friedlingstein et al., 2026; Ciais et al., 2026). Temuan ini menunjukkan pentingnya memasukkan kebakaran dalam analisis fluks tahunan, tetapi tidak berarti api merupakan penyebab tunggal pelemahan penyerap karbon global. Kerangka neraca harus menilai fluks fotosintesis, respirasi, penggunaan lahan dan api secara bersamaan.

Untuk komunikasi publik, setiap angka perlu disertai unit, periode, wilayah, jenis gas dan metode. “Ton karbon” berbeda dengan “ton CO_2”; emisi bruto

berbeda dari emisi bersih; emisi tahunan berbeda dari total kumulatif; emisi berdasarkan aktivitas kebakaran berbeda dari inventaris antropogenik. Grafik yang mengabaikan pembedaan ini dapat menimbulkan kesimpulan keliru tentang tren atau kontribusi negara. Ketelitian bahasa merupakan bagian dari integritas ilmiah.

Ketidakpastian dapat dikelola melalui triangulasi. Satelit memberikan cakupan luas; pengukuran lapangan memeriksa kedalaman dan komposisi; data atmosfer membantu menguji konsentrasi; inventaris nasional menghubungkan emisi dengan kebijakan; dan penelitian sosial menunjukkan siapa yang terpapar dan terdampak. Ketika berbagai sumber bukti menunjukkan pola yang searah, keyakinan terhadap kesimpulan meningkat, meski nilai pasti tetap memiliki rentang.

11. Pengelolaan hutan dan gambut sebagai mitigasi iklim

Pencegahan kebakaran berisiko tinggi menawarkan manfaat iklim melalui emisi yang dihindari dan stok karbon yang terlindungi. Langkah dasar meliputi pengendalian pembukaan lahan dengan api, pengelolaan bahan bakar, patroli pada masa rawan, perlindungan kawasan hutan bernilai tinggi, pengawasan konsesi, tata kelola izin dan kesiapan pemadaman. Tindakan perlu disesuaikan dengan ekologi setempat; kebijakan pemadaman total pada ekosistem yang secara alami bergantung pada kebakaran dapat merusak fungsi ekologis dan menimbulkan akumulasi bahan bakar.

Pada gambut, menjaga kondisi hidrologis merupakan tindakan mitigasi sekaligus adaptasi. Pembasahan kembali dan pengelolaan kanal mengurangi kondisi yang memungkinkan pembakaran tanah organik. Perlindungan kubah gambut mencegah pengeringan dan mempertahankan kapasitas penyimpanan air. Restorasi perlu direncanakan secara ekologis dan sosial, karena intervensi yang tidak memperhitungkan lahan pertanian, permukiman dan hak masyarakat dapat menghasilkan konflik atau perpindahan risiko.

Pengelolaan hutan lestari dapat mengurangi kebakaran melalui perlindungan tutupan, pengurangan fragmentasi, pengendalian penebangan ilegal dan pemulihan area terdegradasi. Pemadaman awal memerlukan titik air, peralatan, tenaga terlatih, akses komunikasi dan koordinasi antara pemerintah, masyarakat serta pemegang izin. Investasi ini harus dilakukan sebelum musim kebakaran. Ketika sistem hanya membiayai respons setelah api besar, biaya berulang dapat melampaui kebutuhan pencegahan.

Restorasi hutan yang rusak dapat menyerap karbon seiring waktu, tetapi bukan alasan untuk mengizinkan hilangnya hutan tua. Hutan sekunder atau restorasi tanaman memiliki struktur dan stok karbon yang berbeda dari hutan alam yang telah berkembang lama. Penyerapan restorasi juga memiliki risiko kebakaran, penyakit, kekeringan, perubahan pasar dan ketidakpastian permanensi. Prinsip prioritasnya adalah menghindari kerusakan pada ekosistem yang masih utuh, kemudian memulihkan area yang telah terdegradasi.

Pengelolaan bahan bakar melalui pembakaran terkendali atau praktik budaya dapat bermanfaat di sejumlah ekosistem, tetapi harus dirancang berdasarkan pengetahuan lokal, kondisi cuaca, kepemilikan lahan dan kapasitas pemantauan. Pembakaran yang disebut terkendali dapat menyebar bila syarat keselamatan tidak terpenuhi. Kebijakan tidak boleh secara otomatis menyamakan semua penggunaan api tradisional dengan pembakaran untuk konversi komersial. Regulasi berbasis bukti dapat mengurangi risiko sekaligus menghormati hak dan kebutuhan masyarakat.

12. Pencegahan berbasis komunitas dan transisi mata pencaharian

Masyarakat lokal sering memiliki pengetahuan terperinci mengenai perubahan air, vegetasi dan titik api di wilayahnya. Sistem pemantauan komunitas dapat memberi peringatan cepat, terutama di lokasi jauh dari stasiun resmi. Agar sistem berjalan, warga memerlukan jalur pelaporan yang dipercaya, peralatan, pelatihan, keselamatan, dukungan operasional dan umpan balik dari

pemerintah. Relawan tidak boleh diminta mengambil risiko yang seharusnya ditangani petugas terlatih.

Petani kecil dapat menggunakan api karena biaya pembukaan lahan rendah, peralatan mekanis sulit diakses, lahan luas atau residu tanaman tidak memiliki pasar. Larangan pembakaran tanpa dukungan alternatif dapat menimbulkan beban tidak adil dan mendorong praktik tersembunyi. Alternatif meliputi pengolahan mekanis skala kelompok, mulsa, kompos, bank alat, jasa pembukaan lahan, pelatihan dan dukungan pasar. Kebijakan perlu menilai kelayakan masing-masing pilihan berdasarkan tenaga kerja, biaya, akses, tanah dan jenis komoditas.

Kepastian tenurial dan pengakuan hak masyarakat adat berpengaruh terhadap insentif menjaga hutan dan gambut. Jika warga memiliki hak kelola yang jelas, mereka lebih mungkin berinvestasi dalam pencegahan jangka panjang, meskipun pengakuan hak saja tidak cukup tanpa dukungan ekonomi dan layanan. Konflik batas dan tumpang tindih izin dapat melemahkan pengawasan. Pemetaan partisipatif dan mekanisme penyelesaian sengketa dapat membantu memperjelas tanggung jawab.

Program desa bebas api harus memiliki indikator yang tidak mendorong manipulasi. Penghargaan berdasarkan “nol hotspot” saja dapat membuat insiden tidak dilaporkan. Indikator sebaiknya menggabungkan kesiapan, kecepatan respons, praktik tanpa bakar, pemeliharaan kanal, kondisi hidrologis dan penurunan kerugian. Pelaporan yang jujur terhadap kebakaran kecil harus diapresiasi sebagai bagian dari deteksi dini, bukan dianggap kegagalan yang harus disembunyikan.

Keadilan transisi mengharuskan kebijakan melindungi pekerja, petani dan rumah tangga yang mata pencahariannya terkait sektor lahan. Pelatihan dan diversifikasi ekonomi dapat membantu jika disertai akses pembiayaan, pasar dan infrastruktur. Konservasi tidak seharusnya memindahkan biaya kepada

kelompok yang memiliki pilihan paling sedikit, sedangkan manfaat karbon diklaim oleh pihak lain. Pembagian manfaat perlu dijelaskan sejak awal dan dapat diperiksa secara terbuka.

13. Tata kelola korporasi, rantai pasok, dan tanggung jawab

Perusahaan yang mengelola lahan atau membeli produk dari lanskap rawan kebakaran memiliki peran besar dalam pencegahan. Pengelolaan risiko perlu mencakup pemetaan lahan dan pemasok, pemeliharaan muka air, larangan pembakaran yang operasional, kapasitas pemadaman, pelatihan pekerja, pelaporan insiden dan mekanisme keluhan masyarakat. Komitmen kebijakan harus didukung anggaran, pejabat penanggung jawab dan verifikasi independen.

Rantai pasok komoditas pertanian dan kehutanan menghubungkan lokasi produksi dengan perusahaan pengolah, pembeli, lembaga keuangan dan konsumen lintas negara. Persyaratan bebas deforestasi atau bebas kebakaran dapat mengubah insentif jika diterapkan dengan keterlacakan yang memadai. Namun, audit berbasis dokumen saja tidak cukup. Data geospasial, konsultasi masyarakat, pemeriksaan lapangan dan pengungkapan pemilik manfaat diperlukan untuk mendeteksi risiko dan menindaklanjuti pelanggaran.

Akuntabilitas korporasi perlu membedakan antara dugaan, bukti administrasi dan bukti hukum. Hotspot yang tumpang tindih dengan konsesi merupakan sinyal untuk verifikasi, bukan bukti final bahwa perusahaan menyalakan api atau melakukan kelalaian. Investigasi harus memeriksa kondisi lokasi, kendali operasional, izin, praktik pencegahan, pola historis dan tindakan setelah kejadian. Proses yang adil meningkatkan legitimasi sanksi dan meminimalkan salah sasaran.

Instrumen ekonomi dapat menginternalisasi sebagian biaya sosial kebakaran. Denda, kewajiban pemulihan, pencabutan izin, pajak atau insentif dapat

dirancang sesuai hukum dan bukti. Prinsip pencemar membayar harus diikuti kemampuan pemerintah mengawasi dan menagih kewajiban. Skema kompensasi karbon dapat memberi imbalan terhadap perlindungan, tetapi perlu mengatasi risiko kebocoran, permanensi, tambahanitas dan penghitungan ganda.

Pelaporan keberlanjutan perusahaan sebaiknya menjelaskan emisi langsung, risiko rantai pasok, luas lahan yang dipantau, insiden kebakaran, tindakan koreksi dan hasil pemulihan. Klaim "net zero" yang bergantung pada offset hutan tidak dapat menggantikan pengurangan emisi operasional dan rantai nilai. Perlindungan karbon hutan harus mencegah emisi yang kredibel dan menghormati hak masyarakat, bukan semata-mata menghasilkan kredit yang mudah dipasarkan.

14. Kebijakan iklim nasional dan kerja sama internasional

Inventaris gas rumah kaca nasional membantu pemerintah mengukur sumber emisi, menyusun target dan melaporkan kemajuan. Metodologi perlu konsisten dengan pedoman IPCC dan disesuaikan dengan data nasional terbaik. Untuk sektor lahan, inventaris harus membedakan perubahan stok biomassa, kebakaran gambut, degradasi, drainase dan pertumbuhan kembali. Transparansi tentang faktor emisi dan ketidakpastian memperkuat kepercayaan internasional serta memperbaiki perencanaan domestik.

Kontribusi yang ditetapkan secara nasional (NDC) dan strategi jangka panjang perlu memasukkan pencegahan kebakaran dalam kerangka kehutanan, gambut dan tata guna lahan. Target yang kredibel harus menghubungkan komitmen dengan kebijakan, pendanaan, penanggung jawab dan mekanisme evaluasi. Pengurangan emisi lahan dapat membantu pencapaian target, tetapi tidak seharusnya mengurangi urgensi transisi energi bersih. Sektor lahan dan energi saling melengkapi dalam mitigasi.

Kerja sama internasional dapat menyediakan dukungan teknologi satelit, pengukuran karbon, prakiraan iklim, restorasi, perlindungan masyarakat dan pembiayaan. Dukungan harus memperkuat kapasitas nasional dan komunitas, bukan membangun proyek yang terputus setelah masa pendanaan berakhir. Persyaratan pembiayaan perlu sederhana, transparan dan sesuai dengan kemampuan lembaga lokal. Bantuan teknis juga harus memberi ruang bagi pengetahuan ilmuwan dan masyarakat dalam negeri.

Pembiayaan berbasis hasil memerlukan baseline yang dapat dipercaya dan perlindungan sosial. Jika pembayaran hanya ditautkan pada angka luas terbakar, ada risiko kebakaran dipindahkan ke wilayah lain, di bawah kanopi yang tidak terdeteksi atau tidak dilaporkan. Indikator perlu menilai emisi bersih, stok karbon, integritas ekosistem, hak masyarakat dan manfaat ekonomi. Sistem pengaduan dan audit independen membantu mengidentifikasi dampak yang tidak muncul dalam laporan agregat.

Kerja sama regional penting karena asap, spesies, air, perdagangan dan risiko iklim melintasi perbatasan. Negara dapat berbagi prakiraan, data kualitas udara, prosedur respons dan pembelajaran restorasi. Namun, negara yang memiliki yurisdiksi atas sumber tetap memegang tanggung jawab utama dalam pencegahan dan penegakan domestik. Solidaritas regional bukan pengganti tata kelola nasional, melainkan cara memperkuatnya dan mengurangi biaya koordinasi.

15. Mengukur efektivitas kebijakan dan indikator kinerja

Jumlah hotspot adalah salah satu indikator pemantauan, tetapi bukan ukuran yang cukup untuk keberhasilan kebijakan. Hotspot bergantung pada sensor dan kondisi pengamatan. Suatu musim dengan lebih sedikit titik panas dapat terjadi karena hujan lebih tinggi, bukan karena pencegahan membaik. Sebaliknya, deteksi yang meningkat dapat menunjukkan sistem satelit lebih

baik. Evaluasi perlu menghubungkan indikator iklim, penggunaan lahan, emisi, kondisi ekosistem dan hasil sosial.

Kerangka kinerja dapat memisahkan masukan, proses, keluaran dan dampak. Masukan mencakup anggaran dan personel; proses mencakup inspeksi dan patroli; keluaran mencakup kanal yang dipulihkan dan warga terlatih; hasil antara meliputi muka air gambut dan praktik tanpa bakar; dampak akhir meliputi luas terbakar, emisi bersih, paparan asap dan pemulihan biodiversitas. Pemisahan tersebut membantu mengidentifikasi bagian rantai kebijakan yang belum bekerja.

Indikator yang dapat digunakan mencakup luas gambut dengan pemantauan hidrologis, tingkat kepatuhan pada larangan pembakaran, waktu respons terhadap api terverifikasi, tren kedalaman kebakaran, karbon yang dilepaskan per tipe lahan, keberhasilan regenerasi, akses masyarakat pada alternatif mata pencaharian, dan jumlah hari dengan kualitas udara berbahaya. Semua indikator perlu memiliki definisi, periode dasar, sumber data, tingkat ketidakpastian dan lembaga pengelola.

Evaluasi perlu memperhitungkan variasi iklim dan faktor luar. Analisis dapat membandingkan lokasi dengan risiko dan karakteristik serupa, memanfaatkan seri waktu panjang, serta mengendalikan curah hujan, kekeringan, perubahan sensor dan perubahan izin. Tidak ada satu metode yang menyelesaikan seluruh masalah atribusi, tetapi penggabungan pendekatan kuantitatif, kualitatif dan pemodelan dapat meningkatkan kualitas penilaian.

Pelaporan terbuka dan tinjauan independen meningkatkan akuntabilitas. Data harus tersedia cukup rinci untuk diuji, namun tetap melindungi privasi dan keselamatan pelapor. Pemerintah dapat menerbitkan laporan tahunan yang menguraikan capaian, kegagalan, faktor iklim, koreksi metodologi dan rencana tindak lanjut. Evaluasi yang jujur mendorong pembelajaran dan mencegah pencapaian semu yang hanya memenuhi target administratif.

16. Agenda riset dan inovasi teknologi

Pengukuran karbon kebakaran membutuhkan jaringan pengamatan yang lebih baik di hutan tropis dan gambut. Pengukuran lapangan dapat menilai biomassa, kedalaman pembakaran, karbon tanah, emisi gas dan pemulihan vegetasi. Penginderaan jauh dengan resolusi tinggi dapat mengidentifikasi perubahan tutupan dan intensitas kebakaran, sedangkan pengukuran atmosfer membantu menguji emisi yang dilepaskan. Penggabungan data memungkinkan estimasi yang lebih akurat dan interval ketidakpastian yang lebih realistis.

Pengembangan model perlu mengintegrasikan bahan bakar, iklim, dinamika api, hidrologi, emisi dan perubahan penggunaan lahan. Model kebakaran sering menggunakan parameter yang belum terukur di wilayah tropis, sehingga dapat menghasilkan bias. Validasi lokal dan uji sensitivitas perlu menjadi praktik rutin. Model juga dapat digunakan untuk mengeksplorasi bagaimana restorasi gambut, pola kanal dan skenario iklim mengubah risiko, tetapi hasilnya harus dikomunikasikan sebagai rentang skenario.

Kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin dapat membantu mengidentifikasi pola anomali, memprediksi risiko dan menggabungkan data besar. Namun, sistem prediksi dapat mewarisi bias data, kurang peka terhadap praktik lokal atau menghasilkan alarm palsu. Keputusan penegakan hukum tidak boleh didasarkan hanya pada model. Sistem perlu dijelaskan, diverifikasi manusia dan memberi kesempatan kepada pihak terdampak untuk memeriksa data yang digunakan.

Agenda riset sosial perlu memahami bagaimana kebijakan pembakaran memengaruhi petani, pekerja, masyarakat adat dan pemerintah desa. Studi dapat membandingkan biaya praktik alternatif, persepsi risiko, kepastian tenurial, jaringan ekonomi dan mekanisme insentif. Riset tata kelola dapat mengevaluasi apakah komitmen rantai pasok mengubah praktik di lapangan,

bagaimana koordinasi pusat-daerah berlangsung dan siapa yang memperoleh manfaat dari pembiayaan karbon.

Penelitian juga perlu memperbaiki estimasi dampak kesehatan dan kesejahteraan. Data paparan resolusi tinggi, rekam medis dengan perlindungan privasi, survei rumah tangga dan informasi sekolah dapat mengungkap pola dampak yang tidak terlihat dalam statistik agregat. Penilaian biaya ekonomi perlu memasukkan hari kerja yang hilang, biaya pengobatan, gangguan pendidikan, kerusakan ekosistem dan kerugian budaya. Pengetahuan tersebut memperkuat alasan investasi dalam pencegahan.

17. Tantangan implementasi dan dilema kebijakan

Pencegahan kebakaran berhadapan dengan kepentingan ekonomi, hak atas lahan dan kebutuhan pembangunan. Pembatasan kegiatan di kawasan rawan dapat menjaga karbon, tetapi berpotensi mengurangi penghasilan jika tidak disertai transisi. Pemerintah harus membedakan antara kegiatan berisiko tinggi yang dikendalikan korporasi dan praktik petani kecil yang dipengaruhi kendala akses. Kebijakan yang hanya melarang tanpa menyediakan alternatif dapat dianggap tidak adil dan sulit ditegakkan.

Perubahan tata guna lahan juga melibatkan pemerintah lintas tingkat. Desentralisasi membawa keputusan lebih dekat ke masyarakat, tetapi dapat menimbulkan perbedaan aturan dan kapasitas pengawasan. Tumpang tindih izin, data bidang tanah yang tidak sinkron dan ketidakjelasan tanggung jawab dapat menghambat investigasi. Integrasi data spasial dan koordinasi lintas lembaga merupakan kebutuhan mendasar, bukan sekadar proyek digital.

Sanksi lingkungan perlu cukup kuat untuk mengubah insentif, tetapi harus didasarkan pada prosedur hukum yang adil. Penegakan yang tidak konsisten dapat memberi kesan bahwa pelaku kecil dihukum sedangkan aktor besar

lolos. Transparansi penyidikan, pemulihan kerugian dan perlindungan saksi penting untuk membangun kepercayaan. Pemerintah harus mengalokasikan sumber daya untuk pengawasan lapangan dan laboratorium, bukan hanya menambah ketentuan regulasi.

Pendanaan juga menjadi tantangan. Restorasi hidrologi, patroli, pemantauan dan layanan kesehatan memerlukan biaya berulang. Proyek jangka pendek dapat membangun sekat kanal atau membeli peralatan, tetapi tidak selalu mendukung pemeliharaan dan kapasitas lokal dalam jangka panjang. Anggaran perlu mencakup operasi, perawatan, pelatihan, evaluasi, pendapatan alternatif dan biaya konsultasi masyarakat.

Risiko kebijakan lain adalah mengandalkan kompensasi karbon tanpa mengurangi emisi fosil. Penyerapan hutan memiliki ketidakpastian dan dapat berbalik akibat kebakaran, hama atau perubahan politik. Emisi fosil yang dilepaskan tetap berada di atmosfer meskipun ada penanaman di tempat lain. Karena itu, klaim offset harus konservatif, transparan dan tidak mengurangi upaya pengurangan emisi pada sumbernya.

18. Pelajaran dari episode kebakaran besar

Peristiwa kebakaran 1997–1998 di Indonesia menempatkan kebakaran gambut dan kabut asap Asia Tenggara dalam agenda kebijakan internasional. Kondisi kering yang kuat berinteraksi dengan pembukaan lahan, drainase gambut dan kapasitas pengendalian yang terbatas. Kerugian tidak hanya berupa emisi, tetapi juga gangguan kesehatan, transportasi, ekonomi dan hubungan antarnegara. Peringatan dari episode tersebut seharusnya memandu persiapan pada musim tanpa asap, ketika perhatian publik dan politik cenderung menurun.

Tahun 2015 memperlihatkan skala emisi dan paparan ketika El Niño kuat bertemu dengan lanskap yang sangat rentan. Analisis emisi kebakaran di Asia

Tenggara maritim menunjukkan bahwa emisi karbon pada 2015 merupakan yang terbesar sejak 1997 dalam rekonstruksi yang diteliti (Huijnen et al., 2016). Estimasi tersebut bergantung pada produk emisi dan asumsi pengukuran, tetapi mempertegas bahwa satu musim kebakaran dapat menghasilkan beban iklim yang sangat besar. Kebakaran gambut pada tahun tersebut juga mendorong pengukuran lapangan yang memperbaiki faktor emisi.

Perbedaan antara 2015 dan 2019 memperlihatkan bahwa kebakaran besar tidak memerlukan kondisi ENSO yang identik. Pada 2019, pengukuran lapangan di Sumatra dan Kalimantan mendokumentasikan emisi gambut pada kondisi ENSO netral, sehingga memberi bukti bahwa drainase, pengelolaan lahan dan kekeringan lokal dapat mempertahankan risiko meskipun indeks iklim global tidak berada pada fase ekstrem (Yokelson et al., 2022). Hal ini menunjukkan bahwa risiko tidak dapat diprediksi hanya dengan satu indeks cuaca.

Perbandingan tersebut mendorong kebijakan berlapis. Prakiraan iklim dapat menentukan waktu kesiagaan, sedangkan peta hidrologi dan tata guna lahan menentukan lokasi prioritas. Sistem peringatan memberi sinyal, tetapi inspeksi dan perlindungan lahan harus berjalan sebelum keadaan darurat. Data dan evaluasi pascakejadian perlu diarsipkan agar pembelajaran tidak hilang ketika personel atau kepemimpinan berganti.

Krisis besar sering menimbulkan komitmen baru, tetapi daya tahan kebijakan diuji setelah krisis mereda. Program pemulihan perlu memiliki dana pemeliharaan; perusahaan perlu tetap diawasi pada tahun tanpa kebakaran; dan pemerintah daerah perlu melaporkan perubahan penggunaan lahan secara rutin. Evaluasi harus melihat apakah emisi dan kerentanan menurun, bukan sekadar apakah dana terserap atau kegiatan administratif terlaksana.

19. Perbedaan rezim kebakaran antar-ekosistem

Tidak ada satu pendekatan pengelolaan kebakaran yang cocok untuk semua ekosistem. Di sejumlah savana, padang rumput dan hutan terbuka, kebakaran dengan frekuensi dan intensitas tertentu merupakan bagian dari proses ekologis. Pemadaman total dapat mengubah komposisi spesies atau menumpuk bahan bakar, lalu meningkatkan risiko api ekstrem. Pengelolaan harus mengenali pola historis, peran pembakaran tradisional dan kebutuhan spesies yang bergantung pada gangguan tertentu.

Hutan hujan tropis lembap biasanya tidak mengalami kebakaran permukaan yang sering dalam keadaan utuh dan basah. Ketika hutan terfragmentasi, ditebang atau mengalami kekeringan, api dapat masuk dan menyebabkan kerusakan yang tidak biasa bagi ekosistem. Pencegahan dimulai dengan mempertahankan tutupan, mencegah pembukaan ilegal, menjaga kelembapan dan mengurangi jalur penyalaan. Api yang muncul di hutan lembap sering menandakan degradasi lanskap yang perlu ditangani lebih luas.

Gambut memiliki mekanisme khusus karena bahan bakarnya tersimpan di bawah permukaan. Api membara dapat terus menyala walaupun permukaan tampak padam, dan hujan ringan mungkin tidak cukup mengembalikan kelembapan lapisan dalam. Pemadaman perlu dilakukan dengan strategi hidrologi dan pemantauan jangka panjang, bukan hanya membasahi permukaan. Perlindungan kawasan gambut utuh dan pengelolaan muka air secara lanskap lebih efisien daripada pemadaman berulang di lahan yang terus dikeringkan.

Ekosistem boreal memberi contoh lain tentang hubungan kebakaran dan karbon. Api dapat melepaskan karbon dari biomassa dan lapisan organik tanah, tetapi vegetasi dapat tumbuh kembali dalam kondisi tertentu. Perubahan iklim, kekeringan, pencairan permafrost dan kebakaran berulang dapat mengubah kecepatan serta keberhasilan pemulihan. Kajian dinamika

karbon terestrial menunjukkan bahwa proses pascakebakaran mencakup pemulihan tajuk, kayu mati, akar, mikroba dan tanah yang berbeda antarbioma (Walker et al., 2023).

Pembandingan lintas bioma berguna untuk belajar, tetapi hasilnya tidak boleh disalin tanpa adaptasi. Praktik pembakaran terkendali di satu ekosistem dapat berbahaya pada gambut yang dikeringkan. Sebaliknya, strategi pemadaman total yang masuk akal pada hutan hujan dapat memiliki konsekuensi di ekosistem yang bergantung pada api. Kebijakan harus berangkat dari ilmu ekologi lokal, riwayat penggunaan lahan, hak masyarakat dan proyeksi perubahan iklim.

20. Integrasi kebijakan iklim, biodiversitas, dan pembangunan

Kebijakan kebakaran berhubungan dengan agenda iklim, konservasi biodiversitas, ketahanan pangan, kesehatan publik dan pembangunan daerah. Program yang hanya menargetkan karbon dapat mengabaikan spesies, air, hak masyarakat atau mata pencaharian. Sebaliknya, program yang menjaga produktivitas tanpa memperhitungkan karbon dan emisi dapat memperbesar risiko jangka panjang. Perencanaan lanskap perlu menetapkan tujuan bersama dan mengenali kemungkinan pertukaran manfaat sejak tahap awal.

Perlindungan hutan alami dapat mendukung mitigasi sekaligus menyediakan habitat, air dan sumber penghidupan. Restorasi dapat meningkatkan simpanan karbon dan konektivitas ekologi, tetapi jenis tanaman dan desain hidrologi menentukan hasil. Penanaman monokultur cepat tumbuh mungkin menyerap karbon di atas tanah namun tidak menggantikan fungsi gambut atau hutan alam. Prinsip ekosistem menuntut penggunaan spesies lokal, pemulihan proses air dan konsultasi dengan komunitas yang tinggal di lanskap tersebut.

Ketahanan pangan dapat selaras dengan pengurangan kebakaran melalui peningkatan produktivitas pada lahan yang sudah dibuka, pengelolaan sisa

panen dan dukungan pasar bagi praktik budidaya tanpa bakar. Namun, intensifikasi tidak selalu berkelanjutan jika menambah penggunaan pupuk, air atau ekspansi lahan baru. Penilaian daur hidup dan tata ruang diperlukan untuk memastikan hasil produksi meningkat tanpa memindahkan tekanan ke hutan yang tersisa.

Perlindungan kesehatan masyarakat perlu menjadi bagian dari analisis manfaat kebijakan. Pengurangan pembakaran mengurangi paparan PM2.5 dan risiko penyakit, memberikan manfaat yang dapat dirasakan lebih cepat dibanding manfaat iklim global. Sekolah, klinik dan layanan darurat dapat menyediakan data tentang paparan dan gangguan. Penggabungan indikator kesehatan dengan inventaris emisi membantu pemimpin melihat bahwa pencegahan memberi keuntungan lintas sektor.

Koordinasi lintas kementerian dan pemerintah daerah membutuhkan struktur akuntabilitas yang jelas. Satu lembaga dapat mengelola data, namun keputusan penggunaan lahan, restorasi, kesehatan dan pemadaman tetap melibatkan banyak pihak. Forum koordinasi harus menetapkan siapa yang memutuskan, mendanai, melaksanakan, dan memverifikasi hasil. Tanpa pembagian itu, tanggung jawab tersebar sehingga tidak ada institusi yang merasa perlu menindaklanjuti kegagalan.

21. Rekomendasi strategis untuk Indonesia dan kawasan

Pertama, prioritaskan pencegahan di lanskap dengan stok karbon dan risiko kebakaran tinggi. Pemerintah perlu menyelaraskan peta gambut, hutan, izin, kanal, titik api historis dan data sosial untuk menentukan lokasi intervensi. Inspeksi harus dilakukan sebelum periode kering. Hasilnya dievaluasi berdasarkan pemeliharaan hidrologis, penurunan risiko dan akses masyarakat, bukan hanya jumlah kegiatan yang selesai.

Kedua, perluas pemulihan gambut dan perlindungan hutan dengan prinsip kesatuan ekosistem. Pengaturan air, restorasi vegetasi, perlindungan kubah gambut dan pengelolaan lahan harus dirancang bersama masyarakat. Intervensi perlu mempertimbangkan banjir, pangan, akses jalan dan pola mata pencaharian agar pemulihan tidak memindahkan risiko atau menimbulkan konflik baru.

Ketiga, kuatkan sistem peringatan dini yang menghubungkan informasi iklim dengan tindakan. Prakiraan kekeringan harus memicu kesiagaan alat, patroli, pemeriksaan kanal, komunikasi warga dan kesiapan layanan kesehatan. Dashboard harus menyajikan ketidakpastian dan memperbarui informasi secara berkala. Masyarakat perlu memiliki saluran melaporkan kebakaran kecil yang ditindaklanjuti.

Keempat, kembangkan mekanisme alternatif tanpa bakar yang sesuai kebutuhan petani. Pemerintah daerah, perguruan tinggi, koperasi dan sektor swasta dapat menguji mekanisasi bersama, pengomposan, pemanfaatan residu dan pembelian produk yang bebas pembakaran. Dukungan harus mencakup biaya awal, pendampingan dan akses pasar. Skema percontohan dievaluasi sebelum diperluas agar tidak membebani petani dengan solusi yang tidak layak.

Kelima, tingkatkan transparansi korporasi dan rantai pasok. Perusahaan perlu memetakan pemasok, mengumumkan tindakan pencegahan dan melaporkan kebakaran serta pemulihan. Pembeli dan pemodal dapat mengaitkan kontrak dengan kinerja yang diverifikasi, sambil memberi dukungan transisi kepada pemasok kecil. Sanksi tetap diterapkan terhadap pelanggaran yang terbukti, dengan proses pemeriksaan dan hak jawab yang jelas.

Keenam, perkuat inventaris emisi dan pemantauan karbon melalui kombinasi data satelit, lapangan dan atmosfer. Laporan nasional harus membedakan emisi bruto, perubahan stok bersih dan kategori inventaris. Ketidakpastian

dipublikasikan agar hasil dapat ditafsirkan dengan benar. Kerja sama riset regional dapat menyamakan protokol pengukuran dan meningkatkan kapasitas ilmiah lembaga lokal.

Ketujuh, jadikan pengurangan risiko kebakaran bagian integral dari strategi iklim, pembangunan dan kesehatan. Pemerintah pusat dan daerah dapat menautkan target NDC, rencana tata ruang, kebijakan kehutanan, kesehatan publik, penanggulangan bencana dan pembangunan desa. Koordinasi lintas sektor harus memiliki pejabat penanggung jawab, anggaran, tenggat dan laporan kemajuan. Dengan demikian, target iklim menjadi kegiatan manajemen yang dapat dilaksanakan.

Kedelapan, lindungi hak dan kesejahteraan masyarakat. Proses restorasi dan konservasi harus melibatkan komunitas dalam perencanaan, pengawasan dan pembagian manfaat. Mekanisme keluhan yang aman serta pengakuan hak tenurial dapat mencegah konflik. Perempuan, pekerja informal dan kelompok rentan perlu terwakili karena mereka dapat mengalami risiko dan kehilangan penghasilan yang berbeda.

Kesembilan, evaluasi kebijakan secara berkala dengan desain yang mempertimbangkan variabilitas iklim. Perbandingan antartahun harus mengontrol kondisi El Niño, Indian Ocean Dipole, curah hujan dan perubahan metode pengamatan. Tinjauan independen dapat menilai apakah kebijakan mengurangi emisi bersih, melindungi penyerap karbon dan memperbaiki kesehatan. Hasil evaluasi digunakan untuk mengubah anggaran dan prosedur, bukan hanya melengkapi laporan.

Kesepuluh, tegaskan bahwa perlindungan hutan dan gambut melengkapi pengurangan emisi bahan bakar fosil. Perencanaan energi bersih, efisiensi, elektrifikasi dan pengurangan metana perlu berlangsung bersamaan dengan pencegahan kebakaran. Sinergi ini menjaga agar alam tidak dibebani untuk

menyerap emisi yang sebenarnya dapat dihindari dari sektor energi dan industri.

22. Tata kelola adaptif dan manajemen risiko

Kebakaran hutan merupakan risiko dinamis, sehingga tata kelola perlu menyesuaikan diri berdasarkan informasi baru. Siklus manajemen dapat dimulai dengan mengenali bahaya dan aset yang terpapar, menetapkan prioritas, memilih tindakan pencegahan, menguji kesiapan, lalu mengevaluasi hasil setelah musim kebakaran. Pendekatan ini menghubungkan data dengan keputusan operasional. Peta risiko yang tidak mengubah anggaran atau tindakan lapangan tidak akan mengurangi risiko secara nyata.

Pemerintah dapat menyusun protokol respons bertingkat. Kondisi pra-musim kering memicu pemeriksaan kanal, patroli, pengadaan peralatan dan edukasi. Peningkatan anomali cuaca memicu aktivasi pos komando dan penguatan pengawasan. Api yang terverifikasi memicu operasi pemadaman, sementara prakiraan asap menyiapkan layanan kesehatan dan sekolah. Kriteria eskalasi harus jelas supaya keputusan cepat sekaligus konsisten dan dapat diaudit.

Pembiayaan harus bergeser dari pola reaktif menuju pencegahan dan kesiapsiagaan. Dana darurat tetap diperlukan, tetapi anggaran tahunan juga harus mencakup pemeliharaan peralatan, restorasi gambut, pelatihan, surveilans, insentif pertanian dan pemantauan. Pemerintah dapat menilai investasi pencegahan melalui kerugian yang dihindari, manfaat kesehatan dan karbon yang dipertahankan. Analisis ekonomi perlu memperhitungkan rentang ketidakpastian dan distribusi manfaat antarkelompok.

Koordinasi pusat dan daerah perlu didukung dengan pembagian peran yang terdokumentasi. Pemerintah pusat menetapkan standar, sistem inventaris dan dukungan fiskal; pemerintah daerah mengintegrasikan tata ruang dan layanan; lembaga teknis memantau kondisi atmosfer dan hidrologi; aparat penegak

hukum menangani pelanggaran; masyarakat memberi informasi lokal; dan perusahaan mengelola risiko di areal operasi. Pembagian ini membutuhkan mekanisme untuk menyelesaikan sengketa kewenangan serta memastikan tugas tidak jatuh di antara lembaga.

Pembelajaran harus dimasukkan ke dalam siklus perencanaan. Tinjauan pascakebakaran sebaiknya mencatat bukan hanya penyebab langsung, tetapi juga kegagalan kanal informasi, konflik tenurial, keterlambatan alat, kekurangan personel dan hambatan mata pencaharian. Hasil tinjauan diterjemahkan menjadi perubahan prosedur, kontrak, anggaran dan pelatihan sebelum musim berikutnya. Dengan cara itu, pengalaman tidak berhenti sebagai laporan retrospektif.

23. Keadilan iklim dan pembagian manfaat

Kebakaran dan mitigasi memiliki dimensi keadilan karena manfaat dan bebannya tidak tersebar merata. Masyarakat yang tinggal dekat gambut atau hutan sering mengalami asap, kehilangan akses lahan dan gangguan kesehatan, sementara manfaat ekonomi dari komoditas dapat mengalir ke pembeli dan pemodal yang jauh. Kebijakan iklim perlu menelusuri siapa yang mengendalikan keputusan, siapa yang memperoleh keuntungan, siapa yang menanggung risiko, dan siapa yang memiliki kapasitas untuk melakukan perubahan.

Pembiayaan iklim untuk konservasi dan restorasi harus memiliki kriteria alokasi yang transparan. Wilayah dengan stok karbon tinggi, risiko kebakaran besar dan kerentanan sosial tinggi dapat menjadi prioritas, sepanjang hak masyarakat dan kebutuhan lokal dihormati. Dana perlu mencakup konsultasi, pemantauan, pengaduan, pengelolaan adaptif dan penguatan ekonomi lokal, tidak hanya kegiatan fisik seperti penanaman atau pembangunan sekat kanal.

Perlindungan hutan tidak boleh menjadi alasan untuk membatasi akses komunitas tanpa proses yang adil. Skema konservasi perlu mengakui hak tenurial, pengetahuan tradisional dan keterlibatan masyarakat dalam pengambilan keputusan. Jika lahan menjadi objek pembiayaan karbon, informasi mengenai kontrak, risiko permanensi, kepemilikan kredit dan pembagian pendapatan harus dapat dipahami warga. Pendampingan independen membantu menghindari persetujuan yang hanya formal.

Perempuan dan kelompok rentan sering memikul beban kesehatan dan pengasuhan tambahan selama kabut asap, tetapi kurang terwakili dalam forum tata kelola. Partisipasi mereka dapat memperbaiki keputusan tentang ruang aman, air bersih, akses layanan, sekolah dan kompensasi kehilangan penghasilan. Data dampak perlu dipilah menurut usia, gender, pekerjaan dan tingkat pendapatan agar kebijakan tidak hanya mencerminkan pengalaman rata-rata.

Keadilan antargenerasi juga penting. Hutan tua dan gambut menyimpan karbon yang terkumpul dalam jangka waktu panjang, sedangkan keuntungan dari ekstraksi dapat diperoleh dalam periode singkat. Keputusan hari ini menentukan risiko banjir, asap, kehilangan biodiversitas dan biaya pemulihan yang akan diwarisi generasi berikut. Penilaian proyek sebaiknya memasukkan nilai jangka panjang tersebut dan tidak hanya membandingkan keuntungan tahunan.

24. Pendidikan, komunikasi risiko, dan literasi karbon

Pendidikan tentang kebakaran dan perubahan iklim perlu menghubungkan konsep karbon dengan pengalaman nyata masyarakat. Siswa dan mahasiswa dapat menelusuri perjalanan karbon dari fotosintesis, penyimpanan dalam biomassa dan gambut, pembakaran, hingga penyerapan kembali melalui regenerasi. Pembelajaran ini membantu menjelaskan mengapa kehilangan

hutan tua tidak setara dengan menanam pohon baru dan mengapa pemulihan ekosistem membutuhkan waktu panjang.

Literasi karbon juga mencakup kemampuan membedakan karbon, karbon dioksida dan karbon dioksida ekuivalen; emisi tahunan dari emisi kumulatif; serta fluks bruto dari neraca bersih. Kemampuan membaca grafik dan memahami ketidakpastian membantu mencegah salah tafsir angka dalam debat publik. Perguruan tinggi dapat menyusun modul lintas disiplin yang menggabungkan ilmu kehutanan, iklim, ekonomi, manajemen dan kebijakan.

Komunikasi risiko pada musim kebakaran harus memberikan informasi yang dapat ditindaklanjuti. Pesan publik sebaiknya menyebut kondisi kualitas udara, tingkat kepastian prakiraan, wilayah yang perlu waspada, saran untuk kelompok rentan dan lokasi layanan. Bahasa yang sederhana tidak harus menghilangkan kualifikasi ilmiah. Bila terdapat ketidakpastian sumber api, pihak berwenang dapat menjelaskan apa yang sudah diketahui dan kapan informasi berikutnya tersedia.

Media massa dan media sosial dapat mempercepat informasi, namun juga menyebarkan foto lama, angka yang tidak sebanding atau klaim yang menstigma wilayah tertentu. Pemerintah dan lembaga ilmiah perlu menyiapkan kanal verifikasi, data visual yang mudah dipahami dan juru bicara teknis. Kesalahan data sebaiknya dikoreksi terbuka sehingga kepercayaan publik tumbuh melalui transparansi, bukan melalui klaim kepastian yang tidak didukung bukti.

Universitas dapat berperan sebagai mitra pemda untuk mengembangkan inventaris lokal, mengukur manfaat restorasi dan mengevaluasi program tanpa bakar. Mahasiswa dapat terlibat dalam pemetaan partisipatif dan analisis data sambil mematuhi etika riset dan keselamatan. Hubungan ini memperluas kapasitas daerah dan menghasilkan pembelajaran yang relevan bagi pembuat kebijakan serta masyarakat.

Literasi risiko harus dipasangkan dengan akses yang setara. Tidak semua keluarga memiliki ruang tertutup, pendingin, masker yang sesuai atau fleksibilitas untuk berhenti bekerja. Karena itu, edukasi tidak boleh memindahkan tanggung jawab perlindungan sepenuhnya kepada individu. Pemerintah, sekolah, perusahaan dan penyedia layanan perlu membangun ruang udara bersih, dukungan kesehatan, perlindungan pekerja dan komunikasi yang bisa diakses warga tanpa internet.

25. Penutup

Kebakaran hutan dan lahan merupakan penghubung langsung antara perubahan kondisi iklim, penggunaan lahan, emisi gas rumah kaca, kesehatan dan ketahanan masyarakat. Api melepaskan karbon dari vegetasi dan tanah; api berulang dapat menurunkan kemampuan ekosistem menyimpan karbon; dan perubahan iklim dapat memperbesar risiko kebakaran melalui panas dan kekeringan di sejumlah wilayah. Hubungan ini membentuk umpan balik yang dapat memperkuat pemanasan, terutama ketika hutan dan gambut berkarbon tinggi kehilangan fungsi ekologisnya.

Besarnya dampak tidak seragam. Jenis ekosistem, kondisi bahan bakar, sejarah kebakaran, praktik pengelolaan, hidrologi dan cuaca menentukan emisi serta peluang pemulihan. Gambut tropis sangat penting karena lapisan organiknya dapat membara dan melepaskan karbon dalam jumlah besar ketika dikeringkan. Hutan tropis juga memiliki nilai karbon dan ekologi yang tidak dapat digantikan dengan cepat melalui penanaman kembali. Pencegahan kehilangan stok karbon yang telah terbentuk selama waktu panjang lebih efektif daripada mengandalkan pemulihan di kemudian hari.

Pengukuran yang baik harus membedakan emisi bruto dan bersih, fluks api dan neraca lahan, karbon dan CO_2, serta estimasi global dan inventaris nasional. Global Carbon Budget terbaru menunjukkan bahwa fluks perubahan penggunaan lahan masih memiliki ketidakpastian besar, sementara variasi

karbon lahan tahunan memerlukan perhatian ilmiah yang terus berkembang. Ketidakpastian tersebut menuntut pengukuran lebih baik, bukan alasan untuk mengabaikan risiko.

Kebijakan yang efektif mencakup perlindungan hutan, pemeliharaan muka air gambut, pemulihan lanskap, pengendalian pembukaan lahan, penegakan hukum yang adil, dukungan alternatif bagi petani dan tanggung jawab korporasi sepanjang rantai pasok. Masyarakat lokal perlu menjadi mitra dan penerima manfaat, bukan hanya pihak yang dibebani larangan atau kehilangan akses. Kerja sama regional, sains dan pembiayaan dapat memperkuat kapasitas nasional serta mempercepat perlindungan lintas batas.

Pada akhirnya, mencegah kebakaran berisiko tinggi adalah tindakan iklim, kesehatan dan pembangunan. Namun, upaya itu harus berjalan bersama pengurangan emisi dari bahan bakar fosil dan sektor industri. Strategi yang mengandalkan alam untuk mengimbangi emisi yang terus bertambah akan rapuh dan tidak adil. Dengan menggabungkan mitigasi, adaptasi, tata kelola lanskap, integritas data dan keadilan sosial, Indonesia dan negara-negara lain dapat mengurangi kontribusi kebakaran terhadap perubahan iklim sekaligus membangun ketahanan yang lebih kuat.

Keberhasilan strategi tersebut bergantung pada hubungan antara komitmen jangka panjang dan keputusan sehari-hari. Muka air gambut, izin penggunaan lahan, kesiapan petugas, mekanisme pengaduan, belanja publik dan pilihan pembeli komoditas semuanya memengaruhi peluang terjadinya api. Setiap keputusan dapat memperbesar atau mengurangi risiko. Tata kelola yang menghubungkan keputusan mikro dengan target iklim nasional membuat mitigasi dapat dilaksanakan, diukur dan dipertanggungjawabkan.

Perubahan iklim bukan proses yang hanya berlangsung di masa depan; dampaknya hadir dalam pola risiko hari ini. Mengurangi kebakaran sekarang melindungi karbon, udara bersih, biodiversitas dan mata pencaharian sekaligus

menambah kapasitas masyarakat menghadapi kondisi yang lebih panas dan kering. Investasi pencegahan karena itu memiliki manfaat segera dan jangka panjang, serta menjadi fondasi pembangunan yang lebih tangguh.

Glossarium

Aerosol: Partikel padat atau cair yang tersuspensi di atmosfer; dampak iklimnya bergantung pada komposisi, ukuran, dan interaksi dengan radiasi serta awan.

Albedo: Proporsi radiasi matahari yang dipantulkan permukaan bumi.

Biomassa: Massa bahan organik hidup atau mati dalam suatu ekosistem, termasuk batang, daun, akar dan seresah.

Dekomposisi: Penguraian bahan organik oleh organisme dan proses kimia, yang dapat melepaskan karbon ke atmosfer.

Emisi bruto: Jumlah gas atau karbon yang dilepaskan oleh suatu proses sebelum memperhitungkan penyerapan kembali atau fluks kompensasi.

Emisi bersih: Selisih antara emisi dan penyerapan dalam batas sistem serta periode yang ditetapkan.

ENSO: El Niño–Southern Oscillation, variasi iklim alami di Pasifik tropis yang memengaruhi pola cuaca global.

Faktor emisi: Koefisien yang menghubungkan aktivitas atau jumlah bahan bakar terbakar dengan jumlah polutan yang dilepaskan.

Fluks karbon: Laju perpindahan karbon antara dua kompartemen, misalnya biosfer dan atmosfer, per satuan waktu.

Gambut: Akumulasi bahan organik yang terbentuk dalam kondisi jenuh air; dapat menyimpan karbon besar dan rentan terbakar bila mengering.

Hotspot: Anomali suhu yang terdeteksi satelit dan dapat menandakan kebakaran; perlu diverifikasi, bukan bukti tunggal adanya pelanggaran.

Indian Ocean Dipole: Variasi suhu permukaan laut Samudra Hindia yang memengaruhi pola curah hujan di kawasan, termasuk Indonesia.

Karbon hitam: Komponen partikel hasil pembakaran tidak sempurna yang menyerap radiasi matahari dan dapat memengaruhi iklim serta kesehatan.

Mitigasi: Upaya mengurangi sumber emisi gas rumah kaca atau meningkatkan penyerapannya.

Neraca karbon: Pencatatan emisi dan penyerapan karbon pada batas wilayah, sektor, periode dan metode yang ditentukan.

Penyerap karbon: Sistem yang menyerap karbon dari atmosfer, misalnya hutan yang tumbuh, tanah dan laut.

PM2.5: Partikel halus dengan diameter aerodinamis hingga 2,5 mikrometer yang dapat menembus jauh ke saluran pernapasan.

Regenerasi: Proses pertumbuhan kembali vegetasi atau ekosistem setelah gangguan.

Umpan balik iklim: Proses ketika perubahan iklim memengaruhi faktor yang kemudian memperkuat atau mengurangi perubahan iklim tersebut.

CO_2 ekuivalen: Satuan yang menyetarakan efek pemanasan berbagai gas rumah kaca dengan jumlah CO_2 menggunakan metrik dan horizon waktu tertentu.

Daftar Pustaka

Andreae, M. O. (2019). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning—An updated assessment. Atmospheric Chemistry and Physics, 19, 8523–8546. https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Le Quéré, C., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., et al. (2026). Global Carbon Budget 2025. Earth System Science Data, 18, 3211–3300. https://doi.org/10.5194/essd-18-3211-2026

Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D. P., Humber, M. L., & Justice, C. O. (2018). The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. Remote Sensing of Environment, 217, 72–85. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005

Global Carbon Project. (2025). Global Carbon Budget 2025. https://globalcarbonbudget.org/gcb-2025/

Huijnen, V., Wooster, M. J., Kaiser, J. W., Gaveau, D. L. A., Flemming, J., Parrington, M., Inness, A., Murdiyarso, D., Main, B., & van Weele, M. (2016). Fire carbon emissions over maritime Southeast Asia in 2015 largest since 1997. Scientific Reports, 6, 26886. https://doi.org/10.1038/srep26886

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. https://www.ipcc.ch/srccl/

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157926

Koplitz, S. N., Mickley, L. J., Marlier, M. E., Buonocore, J. J., Kim, P. S., Liu, T., Sulprizio, M. P., DeFries, R. S., Jacob, D. J., Schwartz, J., Pongsiri, M., & Myers, S. S. (2016). Public health impacts of the severe haze in Equatorial Asia in September–October 2015: Demonstration of a new framework for informing fire management strategies to reduce downwind smoke exposure. Environmental Research Letters, 11(9), 094023. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094023

Kuwata, M., Lee, W. L., Jung, J., & Matsui, H. (2017). Temperature and burning history affect emissions of greenhouse gases and aerosol particles from tropical peatland fire. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122(24), 13,865–13,882. https://doi.org/10.1002/2016JD025897

Murdiyarso, D., Swails, E., Hergoualc'h, K., Bhomia, R., & Sasmito, S. D. (2024). Refining greenhouse gas emission factors for Indonesian peatlands and mangroves to meet ambitious climate targets. Proceedings of the National Academy of Sciences, 121(17), e2307219121. https://doi.org/10.1073/pnas.2307219121

Page, S. E., & Hooijer, A. (2016). In the line of fire: The peatlands of Southeast Asia. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 371(1696), 20150176. https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0176

Reid, J. S., Xian, P., Hyer, E. J., Flatau, M. K., Ramirez, E. M., Turk, F. J., Sampson, C. R., Zhang, C., Fukada, E. M., & Maloney, E. D. (2012). Multi-scale meteorological conceptual analysis of smoke haze episode from the 2010 Indonesian biomass burning season. Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 6395–6406. https://doi.org/10.5194/acp-12-6395-2012

Yokelson, R. J., Saharjo, B. H., Stockwell, C. E., Putra, E. I., Jayarathne, T., Akbar, A., Albar, I., Blake, D. R., Graham, L. L. B., Kurniawan, A., Meinardi, S., Ningrum, D., Nurhayati, A. D., Saad, A., Sakuntaladewi, N., Setianto, E., Simpson, I. J., Stone, E. A., Sutikno, S., ... Cochrane, M. A. (2022). Tropical peat fire emissions: 2019 field measurements in Sumatra and Borneo and synthesis with previous studies. Atmospheric Chemistry and Physics, 22, 10173–10194. https://doi.org/10.5194/acp-22-10173-2022

Walker, X. J., Baltzer, J. L., Cumming, S. G., Day, N. J., Goetz, S. J., Johnstone, J. F., Mack, M. C., Turetsky, M. R., & Rogers, B. M. (2023). Terrestrial carbon dynamics in an era of increasing wildfire. Nature Climate Change, 13, 1306–1316. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01881-4

Ciais, P., Ke, P., Yao, Y., Sitch, S., Li, W., Xu, Y., Du, X., Gui, X., Bastos, A., Zaehle, S., Poulter, B., Colligan, T., van der Woude, A. M., Peters, W., Liu, Z., Jin, Z., Tian, X., Wang, Y., Liu, J., ... Chevallier, F. (2026). Low latency global carbon budget indicates reduced land carbon sink in the year 2024. National Science Review, 13(2), nwaf594. https://doi.org/10.1093/nsr/nwaf594

van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., van Leeuwen, T. T., Chen, Y., Rogers, B. M., Mu, M., van Marle, M. J. E., Morton, D. C., Collatz, G. J., Yokelson, R. J., & Kasibhatla, P. S. (2017). Global fire emissions estimates during 1997–2016. Earth System Science Data, 9, 697–720. https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017

Zheng, B., Ciais, P., Chevallier, F., Yang, H., Canadell, J. G., Chen, Y., van der Velde, I. R., Aben, I., Chuvieco, E., & Davis, S. J. (2021). Increasing forest fire emissions despite the declining burned area in the 21st century. Science Advances, 7(39), eabh2646. https://doi.org/10.1126/sciadv.abh2646