Dampak El Niño terhadap Kebakaran Hutan dan Lahan di Indonesia



El Niño membuat Indonesia lebih kering dan rentan kebakaran hutan dan lahan.

Dampak paling besar terlihat di Sumatra, Kalimantan, dan Papua yang memiliki hutan dan lahan gambut luas.

EL NIÑO → RISIKO KEKERINGAN

Hujan berkurang • musim kering memanjang • vegetasi dan gambut mengering.

API DIPICU AKTIVITAS MANUSIA

Kekeringan memperbesar peluang api menyebar; bukan satu-satunya penyebab.

ENSO / IOD
Mengubah pola hujan di Indonesia.

+

Lahan kering
Vegetasi dan gambut lebih mudah terbakar.

+

Sumber api
Misalnya pembukaan lahan dengan membakar.

→

Kebakaran meluas
Api cepat menyebar di hutan dan lahan, terutama saat kondisi sangat kering.

DAMPAK

Asap & kesehatan
Menurunkan kualitas udara dan mengganggu kesehatan masyarakat.

Emisi karbon
Meningkatkan emisi gas rumah kaca dari kebakaran hutan dan lahan.

Biodiversitas
Merusak habitat dan mengancam kelangsungan satwa serta ekosistem.

Penghidupan & ekonomi
Mengganggu aktivitas masyarakat, menurunkan produktivitas, dan merugikan ekonomi lokal.

STRATEGI ADAPTASI

Jaga gambut tetap basah
Mempertahankan muka air dan memulihkan ekosistem gambut.

Pembukaan lahan tanpa bakar
Mendorong pertanian dan usaha berkelanjutan tanpa pembakaran.

Peringatan dini & patroli
Memantau risiko kebakaran dan memperkuat pengawasan di lapangan.

Pemadaman aman dan cepat
Respons yang terkoordinasi, aman, dan efektif saat kebakaran terjadi.

Restorasi dan tanggung jawab bersama
Memulihkan ekosistem serta melibatkan pemerintah, dunia usaha, dan masyarakat.

El Niño memperbesar bahaya;
pencegahan dan tata kelola menentukan besarnya dampak.

Oleh: Prof. Ir. Rudy C. Tarumingkeng, PhD
www.rudyct.com/cv.pdf
Guru Besar Manajemen dan AI Data Analyst | IBM-ASMI
RudyCT Academic Series

Dampak El Niño terhadap Kebakaran Hutan dan Lahan di Indonesia

Prof. Ir. Rudy C. Tarumingkeng, PhD
www.rudyct.com/cv.pdf

IBM-ASMI | RudyCT Academic Series

Abstrak

El Niño–Southern Oscillation (ENSO) merupakan pengendali iklim antar-tahunan yang dapat mengurangi hujan di sebagian wilayah Indonesia, memperpanjang periode kering, dan menaikkan peluang terjadinya kebakaran hutan dan lahan. Hubungan tersebut tidak bersifat mekanis: El Niño tidak menyalakan api dan bukan satu-satunya penyebab kebakaran. Api umumnya berhubungan dengan aktivitas manusia, sedangkan kekeringan, drainase gambut, kondisi bahan bakar, angin, aksesibilitas, insentif ekonomi, tata guna lahan, dan kapasitas pengendalian menentukan apakah penyalaan berkembang menjadi kebakaran luas. Artikel ini menguraikan mekanisme ENSO dan IOD, karakteristik kebakaran Indonesia, kerentanan gambut, dampak ekologis, kesehatan, sosial-ekonomi, serta instrumen pencegahan dan respons. Sintesis studi kejadian 1997–1998, 2006, 2015, dan penelitian baru menekankan sifat nonlinier hubungan curah hujan dan api, variasi spasial, serta kemungkinan kebakaran besar terjadi pada berbagai fase ENSO. Karena itu, prakiraan El Niño penting bagi kesiapsiagaan musiman, tetapi tidak dapat menggantikan pengelolaan risiko sepanjang tahun. Strategi yang disarankan

mengutamakan pencegahan melalui pengelolaan hidrologi gambut, pemantauan berbasis cuaca dan kondisi lokal, tata kelola penggunaan lahan, alternatif pembukaan tanpa bakar, kesiapan masyarakat dan pemadam, penegakan hukum yang adil, perlindungan kesehatan, dan evaluasi pascakejadian. Informasi BMKG pada September 2026 menunjukkan El Niño sangat kuat dan potensi keterlambatan musim hujan 2026/2027; informasi tersebut diperlakukan sebagai konteks operasional bertanggal yang harus diperbarui. Kesimpulan utamanya ialah bahwa El Niño memperbesar bahaya kebakaran, sedangkan pencegahan, tanggung jawab penggunaan lahan, dan kapasitas kelembagaan menentukan besarnya bencana.

Kata kunci: El Niño; ENSO; kebakaran hutan dan lahan; karhutla; gambut; IOD; kekeringan; pencegahan kebakaran; Indonesia

1. Pendahuluan

Kebakaran hutan dan lahan (karhutla) merupakan salah satu masalah lingkungan paling kompleks di Indonesia. Dampaknya melintasi batas kawasan dan sektor: hutan, lahan gambut, perkebunan, permukiman, kesehatan masyarakat, transportasi, penerbangan, pendidikan, serta hubungan antarwilayah. Pada tahun tertentu, api muncul sebagai titik lokal yang cepat dipadamkan; pada tahun lain, api menjalar berbulan-bulan dan asap menyebar jauh. Variasi tersebut berkaitan dengan cuaca, tetapi juga dengan kondisi lanskap dan keputusan manusia sebelum musim kering berlangsung.

El Niño sering muncul dalam pemberitaan ketika musim kemarau terasa lebih panjang atau ketika kebakaran meningkat. Hubungan ilmiahnya nyata: El Niño dapat menekan hujan di sebagian Indonesia dan menaikkan peluang periode kering. Namun, korelasi ini tidak berarti setiap El Niño otomatis menimbulkan kebakaran besar, atau kebakaran dapat dijelaskan oleh satu indeks iklim. Api

memerlukan sumber penyalaan; luas dan durasi kebakaran dipengaruhi oleh bahan bakar, kelembapan, angin, topografi, drainase gambut, praktik pemanfaatan lahan, dan kapasitas pemadaman.

Artikel ini menempatkan El Niño sebagai faktor pemicu dan penguat bahaya dalam sistem risiko yang lebih luas. Tujuannya ialah menjelaskan mekanisme iklim, menguraikan kerentanan ekosistem Indonesia, meninjau dampak, dan merumuskan strategi pengendalian dari tingkat tapak hingga kebijakan nasional. Pendekatan ini penting agar respons tidak berhenti pada pemadaman darurat dan dapat mengurangi kondisi struktural yang membuat kebakaran berulang.

2. Mengenal El Niño dan ENSO

ENSO adalah pola interaksi laut–atmosfer di Pasifik tropis yang memiliki fase hangat (El Niño), fase dingin (La Niña), dan fase netral. Pada kondisi netral, angin pasat umumnya mendorong air hangat ke Pasifik barat, tempat konveksi dan hujan tropis sering aktif di sekitar Indonesia. Ketika El Niño berkembang, anomali suhu muka laut di Pasifik tengah atau timur meningkat dan angin pasat melemah. Pusat konveksi bergeser ke arah timur, sementara sirkulasi Walker berubah dan peluang hujan di sebagian Indonesia menurun.

El Niño dipantau menggunakan anomali suhu muka laut, indeks ENSO, serta respons atmosfer. Indikator dan definisi operasional dapat berbeda antar lembaga, sehingga kategori intensitas perlu dibaca bersama periode acuan dan indikator yang digunakan. Tingkat pemanasan di Pasifik tidak dapat langsung disamakan dengan besarnya defisit hujan di setiap provinsi. Dampak lokal dipengaruhi musim, topografi, perairan sekitar Indonesia, dan faktor iklim lain.

Bagi pengelola lingkungan, nilai ENSO adalah sebagai indikator risiko musiman dan informasi antisipatif. Indeks tersebut dapat membantu

mengatur kesiapan patroli, pengelolaan air, komunikasi risiko, dan distribusi sumber daya. Namun, keputusan operasional perlu mempertimbangkan pengamatan lokal seperti hari tanpa hujan, kelembapan bahan bakar, muka air gambut, angin, serta keberadaan aktivitas manusia.

3. Mengapa musim kering meningkatkan risiko api

Kebakaran terjadi ketika bahan bakar mudah terbakar, tersedia sumber penyalaan, dan kondisi cuaca memungkinkan api menyebar. Vegetasi kering, serasah, semak, dan gambut menjadi bahan bakar. Hujan yang rendah mengurangi kelembapan bahan bakar, sedangkan suhu dan radiasi matahari meningkatkan pengeringan. Angin menambah pasokan oksigen dan dapat mendorong penjalaran api. Namun, tanpa sumber penyalaan—alami atau lebih sering terkait aktivitas manusia—kondisi kering tidak otomatis menjadi kebakaran.

Kekeringan juga memengaruhi kemampuan pemadaman. Api permukaan pada tanah mineral mungkin dapat dikendalikan dengan cepat jika akses, air, dan personel tersedia. Sebaliknya, kebakaran gambut dapat menjalar di bawah permukaan dan bertahan meski api terlihat padam. Asap tebal mengurangi jarak pandang dan menimbulkan bahaya bagi petugas. Penundaan respons dapat membuat kebakaran kecil berubah menjadi insiden kompleks yang membutuhkan koordinasi lintas lembaga.

Risiko api bersifat kumulatif. Beberapa minggu tanpa hujan mengeringkan vegetasi; defisit berlanjut menurunkan muka air gambut; pembakaran atau puntung api memulai penyalaan; lalu angin dan sulitnya akses membuat api meluas. Sistem pencegahan harus memotong rantai ini lebih awal, bukan menunggu terlihatnya asap atau hotspot.

4. Pola hujan, ENSO, dan variasi wilayah

Pengaruh El Niño terhadap hujan Indonesia tidak seragam. Pola umumnya lebih kering di sebagian besar wilayah selatan ekuator selama musim kemarau, tetapi besarnya dampak berbeda menurut pulau dan waktu. Analisis kebakaran 1997–2015 menunjukkan hubungan hujan dan api bervariasi antarwilayah; kebutuhan lama pengamatan hujan yang relevan untuk mengidentifikasi risiko tinggi berbeda antara selatan Kalimantan, Sumatra selatan, dan Sumatra utara (Fanin & van der Werf, 2017).

Indian Ocean Dipole (IOD) dapat memperkuat atau memodifikasi pengaruh ENSO. Fase IOD positif dapat mengurangi hujan di sebagian wilayah Indonesia, sehingga kejadian El Niño dan IOD positif yang bersamaan meningkatkan risiko kekeringan dan api. Pengaruhnya tidak sama di seluruh lokasi; kajian luas terbakar menunjukkan perbedaan area Kalimantan yang lebih dipengaruhi IOD atau kombinasi ENSO-IOD (Nurdiati et al., 2022). Monsun Australia dan gangguan atmosfer intramusiman juga memengaruhi kapan kekeringan menguat atau melemah.

Perencanaan karhutla perlu memanfaatkan prakiraan probabilistik dari BMKG, analisis daerah rawan, dan verifikasi lapangan. Peta nasional tidak cukup untuk menentukan kapan sebuah desa harus mengaktifkan patroli atau kapan sekat kanal perlu diperbaiki. Informasi harus dipadukan pada skala provinsi, kabupaten, lanskap, dan konsesi sesuai sumber risiko serta kapasitas respons.

5. IOD dan faktor iklim lain

IOD adalah variasi gradien suhu muka laut di Samudra Hindia yang dapat berpengaruh terhadap pembentukan awan dan distribusi hujan di Indonesia. Dalam fase positif, Samudra Hindia bagian timur dekat Indonesia relatif lebih dingin daripada bagian barat, sehingga suplai uap air ke beberapa wilayah dapat menurun. Jika fase positif bertepatan dengan El Niño, kondisi kering

berpotensi berlangsung lebih intens atau lebih lama. Meski demikian, interaksi ENSO-IOD bersifat dinamis dan tidak selalu sama dari satu kejadian ke kejadian berikutnya.

Pemodelan kebakaran perlu memasukkan lebih dari suhu laut. Kelembapan tanah, hari tanpa hujan, angin, temperatur, radiasi, kondisi muka air gambut, tutupan lahan, dan sejarah kebakaran memengaruhi peluang api. Penelitian tentang wilayah Borneo Indonesia menunjukkan bahwa kombinasi prediktor lokal dan telekoneksi membantu memahami kekeringan serta risiko api, sementara kinerja model dapat meremehkan kekeringan bila representasi ENSO dan konveksi lokal tidak tepat (Lam et al., 2024).

Indikator cuaca kebakaran seperti Keetch–Byram Drought Index, Fire Weather Index, dan indikator berbasis hujan dapat membantu, tetapi harus dikalibrasi terhadap jenis ekosistem Indonesia. Indeks dari wilayah lain tidak otomatis mewakili gambut tropis atau mosaik lahan yang memiliki praktik pengelolaan berbeda. Kalibrasi lokal dan pengujian historis merupakan bagian penting dari sistem peringatan dini.

6. Peran manusia dan penggunaan lahan

Api di Indonesia banyak digunakan sebagai alat untuk membuka dan mengelola lahan karena relatif murah dan mudah diterapkan. Praktik tersebut berbeda menurut lokasi, skala usaha, jenis lahan, dan konteks sosial. Pada tanah mineral, api dapat digunakan untuk membersihkan residu; pada gambut, penyalaan berisiko tinggi karena bahan organik menyala dan merambat di bawah permukaan. Praktik tanpa bakar membutuhkan biaya, alat, dan akses pasar yang mungkin tidak dimiliki petani kecil.

Analisis atas kejadian 2015 menunjukkan bahwa kebakaran berkaitan dengan interaksi faktor iklim dan sosial-ekonomi. Daerah yang lebih terpencil, kurang berkembang, memiliki riwayat pembakaran untuk pertanian, serta perubahan

tata kelola administratif tertentu menunjukkan pola risiko yang berbeda. Penelitian Edwards et al. (2020) menyimpulkan bahwa El Niño menjelaskan sebagian besar variasi kebakaran tahunan, tetapi kebijakan desentralisasi dan perkembangan ekonomi lokal juga turut membentuk risiko.

Penting untuk menghindari tuduhan yang menyamaratakan seluruh petani atau komunitas sebagai penyebab. Pemetaan sumber api perlu didasarkan pada bukti, skala kegiatan, hak atas lahan, dan distribusi manfaat ekonomi. Kebijakan yang adil membedakan pembukaan lahan subsisten, operasi perusahaan, kelalaian pengelolaan, dan tindakan sengaja yang melanggar aturan. Penegakan hukum dan dukungan alternatif harus berjalan bersama.

7. Gambut dan karakter kebakaran bawah permukaan

Gambut terbentuk dari bahan organik yang terakumulasi dalam keadaan jenuh air. Keadaan basah menekan penguraian cepat dan menjaga fungsi penyimpanan karbon serta air. Kanal drainase menurunkan muka air; gambut mengering, mengalami oksidasi, subsidensi, dan menjadi bahan bakar. El Niño dapat mempercepat penurunan muka air melalui defisit hujan, sehingga kebakaran lebih mudah terjadi dan lebih sulit dipadamkan.

Api gambut dapat membara di bawah permukaan dengan nyala kecil atau tanpa nyala yang terlihat jelas. Deteksi visual dari udara dapat melewatkan titik panas di bawah tanah, sementara hotspot satelit memiliki batas resolusi dan waktu lintasan. Pemadaman memerlukan pembasahan mendalam, pengecekan perimeter, dan pemantauan ulang setelah api tampak padam. Air yang tidak cukup atau pemadaman yang hanya menyiram permukaan berisiko membiarkan bara hidup kembali.

Pengamatan muka air gambut dapat menjadi indikator peringatan dini. Data panjang di Kalimantan Tengah menunjukkan bahwa muka air tanah turun tajam pada periode super El Niño 1997/98 dan 2015 serta kejadian IOD positif

tertentu; pengamatan tersebut berpotensi membantu mengidentifikasi ancaman sebelum api menyebar (Sulaiman et al., 2023). Pemantauan hidrologi perlu menggabungkan stasiun, sensor, pengamatan masyarakat, dan informasi cuaca.

8. Kebakaran lahan mineral dan lanskap mosaik

Kebakaran pada lahan mineral memiliki dinamika berbeda dari kebakaran gambut. Bahan bakar permukaan, vegetasi sekunder, padang rumput, semak, dan residu pertanian dapat mengering dengan cepat. Pada lanskap mosaik, petak hutan, perkebunan, kebun kecil, dan permukiman saling berdekatan. Api yang bermula dari pembakaran terkendali dapat keluar dari batas petak akibat angin, kurangnya sekat, atau keterlambatan pengawasan.

Jalan dan kanal mengubah akses ke kawasan sekaligus memengaruhi pola penyalaan. Akses jalan dapat meningkatkan kemampuan pemadaman, tetapi juga memudahkan pembukaan lahan dan masuknya sumber api. Karena itu, infrastruktur perlu dianalisis dari dua sisi: manfaat untuk respons dan kontribusinya terhadap paparan kebakaran. Pengelolaan harus memperhatikan kepadatan aktivitas manusia, sejarah terbakar, kemiringan lahan, dan jenis vegetasi.

Pencegahan pada lanskap mosaik menuntut kerja sama antar pemilik dan pengguna lahan. Sekat bakar, pengelolaan residu, jadwal pembakaran jika diizinkan, pemantauan komunitas, serta akses air harus dirancang bersama. Aturan lokal yang jelas dapat mencegah api menyeberang dari satu petak ke petak lain, dengan mekanisme pertanggungjawaban bagi pihak yang menyebabkan penyalaan tidak terkendali.

9. Nonlinearitas hubungan hujan dan kebakaran

Hubungan curah hujan dengan kejadian api tidak selalu linear. Penurunan hujan kecil pada kondisi lembap mungkin tidak menambah banyak api, tetapi pengeringan panjang dapat menurunkan kadar air bahan bakar melewati ambang kritis. Pada kondisi tersebut, jumlah api dan luas terbakar dapat meningkat tajam. Field et al. (2016) menunjukkan sensitivitas nonlinier kebakaran dan polusi asap Indonesia terhadap kekeringan yang dipicu El Niño, khususnya pada lanskap gambut terdegradasi.

Fanin dan van der Werf (2017) menemukan bahwa periode tanpa hujan yang lebih panjang menjelaskan hubungan nonlinier antara hujan dan aktivitas api. Mereka juga menunjukkan fraksi kebakaran pada lahan gambut lebih tinggi pada 2015 dibanding 1997, meskipun banyak indikator aktivitas api berbeda. Ini memperingatkan bahwa total hujan bulanan saja dapat mengaburkan risiko; panjang rentang tanpa hujan dan kondisi hidrologi lebih informatif.

Penerapan ambang perlu didasarkan pada observasi historis dan evaluasi. Sebuah ambang KBDI atau jumlah hari tanpa hujan dapat membantu pemicu patroli, tetapi mungkin berbeda untuk jenis tanah, tutupan lahan, dan wilayah. Sistem harus menguji konsekuensi positif palsu maupun negatif palsu: terlalu sering mengaktifkan status siaga dapat menguras sumber daya, sementara peringatan yang terlambat meningkatkan kerusakan.

10. Perbedaan kejadian 1997, 2006, 2015, dan seterusnya

Kebakaran 1997–1998 berlangsung dalam kondisi kekeringan kuat dan menjadi bencana ekologis serta kesehatan yang menimbulkan asap lintas batas. Peristiwa tersebut membuka perhatian internasional pada kebakaran gambut Indonesia dan besarnya emisi dari pembakaran biomassa serta tanah organik. Pengukuran karbon dan kajian pascakejadian memperlihatkan bahwa

kebakaran tidak hanya merusak vegetasi di atas tanah, tetapi juga membakar stok karbon yang terakumulasi dalam waktu panjang (Page et al., 2002).

Kejadian 2006 dan 2015 menunjukkan bahwa kombinasi kondisi ENSO dan IOD, pola hujan, serta perubahan penggunaan lahan membentuk intensitas kebakaran. Tahun 2015 memperlihatkan krisis asap besar di tengah El Niño kuat dan kondisi lahan yang mudah terbakar. Studi atmosfer menunjukkan emisi kebakaran gambut menghasilkan campuran gas dan aerosol berbahaya (Stockwell et al., 2016; Field et al., 2016).

Perbandingan kejadian historis tidak boleh menimbulkan kesan bahwa masa depan hanya berisiko ketika El Niño sangat kuat. Studi 2026 menggunakan ensemble simulasi iklim dan menemukan risiko kebakaran besar di Borneo meningkat sekitar 2,7 kali ketika El Niño, tetapi risiko masih dapat terjadi pada semua fase ENSO; IOD dan gelombang Rossby juga berperan (Lam et al., 2026). Ini adalah temuan penting untuk perencanaan: pemantauan ENSO membantu, tetapi kesiapsiagaan harus berlangsung setiap tahun.

11. Pemantauan titik panas, api, dan luas terbakar

Titik panas atau hotspot merupakan anomali termal yang terdeteksi satelit dan berguna sebagai petunjuk aktivitas api. Hotspot bukan pengukuran langsung luas terbakar, bukan pula bukti tunggal siapa yang bertanggung jawab. Awan, asap, waktu lintasan, ukuran api, suhu, dan sensor dapat memengaruhi deteksi. Sistem operasional perlu menggabungkan sensor berbeda, laporan lapangan, data cuaca, dan verifikasi sebelum menentukan respons.

Luas terbakar dihitung dari perubahan permukaan lahan melalui citra optik atau radar. Tutupan awan, asap, jenis vegetasi, pembakaran berulang, dan resolusi citra memengaruhi estimasi. Validasi lapangan diperlukan untuk mengetahui apakah area terbakar berupa hutan primer, lahan pertanian,

gambut, atau vegetasi sekunder. Data luas terbakar menjadi dasar evaluasi ekologis, emisi, dan kinerja kebijakan.

Pemantauan yang efektif menghubungkan deteksi dengan prosedur respons. Informasi perlu menjelaskan lokasi, tingkat keyakinan, akses terdekat, jenis bahan bakar, kondisi angin, sumber air, dan kontak petugas. Dashboard yang tidak dihubungkan dengan kewenangan dan sumber daya hanya menampilkan situasi. Protokol harus menjelaskan siapa menerima sinyal, siapa memverifikasi, siapa mengirim tim, dan kapan eskalasi dilakukan.

12. Emisi dan perubahan atmosfer

Kebakaran hutan dan lahan melepaskan karbon dioksida, karbon monoksida, metana, partikulat, dan senyawa organik volatil. Komposisi emisi bergantung pada jenis biomassa, tingkat kelembapan, suhu pembakaran, serta proporsi gambut yang terbakar. Kebakaran gambut yang membara sering menghasilkan asap dalam durasi panjang dan komposisi berbeda dari api permukaan yang cepat padam. Pengukuran emisi membutuhkan sensor lapangan, satelit, dan model transportasi atmosfer.

Asap dapat mengurangi radiasi matahari dan memengaruhi fotosintesis, serta mengubah kualitas udara lokal dan regional. Partikel dan gas dibawa angin ke wilayah permukiman dan negara tetangga. Kebakaran besar juga dapat menjadi sumber emisi yang signifikan dalam inventaris karbon nasional. Penghitungan emisi perlu membedakan api yang menyala dari dekomposisi gambut akibat drainase yang berlangsung bahkan di luar musim kebakaran.

Pemantauan emisi berfungsi untuk menilai dampak iklim dan efektivitas pencegahan, tetapi tidak menggantikan evaluasi kesehatan atau biodiversitas. Satu angka emisi tidak menunjukkan siapa terpapar, habitat apa yang hilang, atau berapa lama penghidupan terganggu. Pelaporan harus menyandingkan indikator atmosfer dengan dampak nyata di lapangan.

13. Dampak terhadap biodiversitas dan fungsi ekosistem

Api dapat membunuh tumbuhan, satwa, mikroorganisme, dan organisme tanah. Dampak bergantung pada intensitas, durasi, frekuensi, musim, dan kemampuan spesies untuk berpindah atau pulih. Hutan yang terbakar berulang dapat berubah struktur dan komposisinya, sementara spesies endemik dengan habitat terbatas lebih berisiko kehilangan tempat hidup. Fragmentasi menyulitkan recolonization dan dapat memutus konektivitas antarkawasan.

Kebakaran gambut memengaruhi fungsi hidrologi, siklus karbon, kesuburan tanah, dan kualitas air. Erosi dan sedimentasi dapat meningkat setelah vegetasi hilang; abu serta bahan organik memasuki sungai dan danau. Perubahan tersebut memengaruhi perikanan, sumber air, dan mata pencaharian. Pemulihan ekosistem sering berlangsung jauh lebih lama daripada masa kejadian api, sehingga pencegahan memiliki nilai ekologis sangat tinggi.

Penilaian dampak perlu menggunakan indikator yang sesuai dengan ekosistem: tutupan tajuk, regenerasi, kematian pohon, kualitas air, muka air gambut, keragaman spesies, dan kejadian api berulang. Penginderaan jauh memberi cakupan, sedangkan inventarisasi lapangan memberi detail. Pengalaman komunitas dapat mengidentifikasi perubahan satwa, sumber pakan, dan lokasi penting yang tidak terlihat dari peta satelit.

14. Dampak terhadap kesehatan masyarakat

Paparan asap kebakaran dapat menyebabkan iritasi mata dan saluran napas, memperburuk asma, penyakit paru kronis, serta penyakit kardiovaskular. Partikulat halus dapat menembus saluran pernapasan bagian dalam. Anak-anak, lansia, ibu hamil, orang dengan penyakit kronis, pekerja luar ruang, dan warga yang tinggal dekat sumber api menghadapi kerentanan lebih tinggi.

Risiko juga dipengaruhi durasi paparan, kondisi rumah, akses layanan kesehatan, dan kemampuan untuk mengurangi aktivitas luar ruang.

Kabut asap mengganggu sekolah, transportasi, penerbangan, dan pelayanan publik. Warga kehilangan pendapatan ketika pekerjaan dihentikan atau jarak pandang membatasi mobilitas. Rumah tangga dengan pendapatan rendah mungkin tidak mampu membeli alat perlindungan atau pindah sementara. Penilaian dampak sosial perlu mengukur distribusi paparan serta akses informasi, bukan hanya konsentrasi udara rata-rata di kota.

Kesiapsiagaan kesehatan meliputi pemantauan PM2.5 dan kualitas udara, pesan risiko yang mudah dipahami, ruang udara bersih, ketersediaan masker yang sesuai, layanan primer siaga, serta prosedur rumah sakit ketika lonjakan pasien terjadi. Sekolah dan pemberi kerja perlu menetapkan batas kegiatan luar ruang. Upaya tersebut melindungi warga, tetapi tidak boleh mengalihkan perhatian dari pengurangan kebakaran sebagai sumber paparan.

15. Dampak ekonomi dan sosial

Karhutla menimbulkan biaya langsung pemadaman dan pemulihan, kerusakan tanaman serta infrastruktur, hilangnya produktivitas, gangguan perdagangan, dan turunnya pariwisata. Biaya tidak langsung mencakup penyakit, kehilangan hari sekolah, berkurangnya hasil hutan, penurunan kualitas habitat, dan emisi karbon. Estimasi ekonomi sering berbeda karena cakupan, metode, serta periode perhitungan yang digunakan.

Kerugian terdistribusi tidak merata. Petani kecil dapat kehilangan lahan dan pendapatan, sementara pekerja informal terpapar asap tanpa perlindungan kerja. Perusahaan mungkin menanggung gangguan pasokan, tetapi mampu melakukan diversifikasi; masyarakat lokal sering tidak memiliki pilihan serupa. Kebijakan pemulihan perlu memprioritaskan kesehatan, air bersih, bantuan penghidupan, dan perlindungan kelompok rentan.

Asap lintas batas memunculkan dimensi diplomasi dan kerja sama regional. Negara tetangga dapat mengalami polusi udara, gangguan ekonomi, dan tekanan publik. Mekanisme regional membantu pertukaran informasi dan dukungan, tetapi pencegahan utama harus dilakukan di tempat sumber api berada. Transparansi data, konsultasi, dan akuntabilitas meningkatkan kepercayaan antarnegara.

16. Kesiapsiagaan pada 2026: konteks operasional

Peristiwa iklim terbaru menunjukkan perlunya menghubungkan riset jangka panjang dengan kesiapsiagaan saat ini. Pada 22 September 2026, BMKG menyatakan El Niño sangat kuat sedang berlangsung dan memproyeksikan awal musim hujan 2026/2027 mundur pada 529 Zona Musim atau 61,08% wilayah, dengan IOD positif turut berpotensi memperkuat kekeringan (BMKG, 2026). Informasi ini merupakan potret pada tanggal rilis, bukan ramalan tetap untuk semua daerah.

Pemerintah Indonesia mengaktifkan koordinasi pengendalian karhutla lintas kementerian dan daerah pada 2026, termasuk kesiapsiagaan di wilayah prioritas, pemantauan cuaca, pengelolaan air, patroli, pemadaman, dan dukungan operasi modifikasi cuaca (Kementerian Kehutanan, 2026; BMKG, 2026). Data operasional dan angka luas terbakar dapat diperbarui berbeda antarinstansi serta metode, sehingga artikel ini tidak menyamakan indikator hotspot, target operasi, dan luas terbakar terverifikasi.

Konteks 2026 memberi contoh bahwa prakiraan El Niño harus mengaktifkan respons yang telah direncanakan. Pemerintah daerah perlu memadukan peta risiko, data cuaca, muka air gambut, dan laporan lapangan. Perusahaan harus menjalankan kewajiban pencegahan pada wilayah kelola. Komunitas memerlukan informasi dan sumber daya. Evaluasi resmi pascakejadian akan

menentukan apakah tindakan tersebut menurunkan kerusakan, bukan semata apakah operasi berlangsung.

17. Pengendalian kebakaran: pencegahan, kesiapsiagaan, respons

Pengelolaan karhutla yang efektif memiliki tiga tahap: pencegahan, kesiapsiagaan, dan respons. Pencegahan berusaha mengurangi penyalaan serta mengelola bahan bakar dan hidrologi. Kesiapsiagaan memastikan personel, alat, data, komunikasi, dan sumber air tersedia sebelum api muncul. Respons mengendalikan api dan melindungi warga, sementara pemulihan menangani dampak dan memperbaiki kondisi yang memungkinkan kejadian berulang.

Pencegahan sering kurang mendapat perhatian karena hasilnya tidak terlihat seperti pemadaman. Namun, pengelolaan muka air gambut, pengawasan izin, pembukaan lahan tanpa bakar, dan tata kelola lanskap dapat mencegah insiden sebelum terjadi. Sistem yang berorientasi pada respons saja akan mengulang biaya setiap musim dan membiarkan faktor struktural tetap ada.

Prioritas tindakan ditetapkan melalui analisis risiko. Wilayah dengan gambut dalam, sejarah api, drainase aktif, akses terbatas, vegetasi kering, dan dekat permukiman memerlukan kesiapsiagaan lebih tinggi. Peta risiko diperbarui dengan data terbaru dan konsultasi lapangan. Penggunaan anggaran diarahkan kepada tindakan yang mengurangi peluang api dan mengurangi konsekuensi jika api terjadi.

18. Restorasi gambut dan tata air

Pembasahan kembali gambut merupakan langkah kunci untuk menurunkan kerentanan. Sekat kanal, pengelolaan pintu air, penimbunan kanal tertentu, serta pemantauan muka air dapat menjaga kondisi tetap basah. Efektivitasnya bergantung pada desain yang sesuai jaringan hidrologi dan pemeliharaan.

Sekat yang rusak atau dipasang tanpa mempertimbangkan aliran lokal tidak akan memberikan manfaat yang diharapkan.

Revegetasi mendukung pemulihan fungsi ekologis dengan spesies yang sesuai kondisi basah. Namun penanaman tidak menggantikan pemulihan hidrologi. Pemilihan spesies, pemeliharaan, perlindungan dari herbivori, dan keterlibatan komunitas menentukan keberhasilan. Restorasi juga perlu memperhitungkan penghidupan dan legalitas penggunaan lahan agar tidak memicu konflik.

Pemantauan restorasi harus dilakukan selama beberapa tahun dan mencakup muka air, tutupan vegetasi, kejadian kebakaran, emisi, biodiversitas, serta manfaat masyarakat. Indikator administratif seperti jumlah sekat kanal tidak cukup. Hasil perlu dievaluasi secara independen dan digunakan untuk memperbaiki desain program.

19. Alternatif pembukaan lahan tanpa bakar

Larangan membakar lahan dapat menurunkan risiko, tetapi keberhasilannya bergantung pada tersedianya alternatif praktis. Petani memerlukan akses mesin, tenaga kerja, pembiayaan, teknik pengelolaan residu, dan pasar. Jika biaya tanpa bakar terlalu tinggi, larangan tanpa dukungan dapat mendorong praktik tersembunyi atau mengurangi penghidupan tanpa menghilangkan penyalaan.

Alternatif dapat meliputi pencacahan residu menjadi mulsa, pengomposan, pemanfaatan biomassa, pengolahan mekanis skala kecil, dan sistem agroforestri. Pilihan berbeda menurut skala lahan dan jenis tanaman. Penyuluh perlu membantu petani membandingkan biaya dan manfaat, sementara koperasi dapat menyediakan alat dan layanan bersama.

Perusahaan dan pemegang izin memiliki kewajiban untuk menerapkan sistem tanpa bakar, mengendalikan api pada wilayah konsesi, dan mendukung

pencegahan di sekitar lanskap operasional. Standar dan audit perlu memastikan praktik tidak hanya bergeser ke pemasok atau lahan lain. Insentif pasar dapat mendukung produksi yang dapat ditelusuri dan bebas pembakaran.

20. Peran masyarakat dan Masyarakat Peduli Api

Komunitas merupakan pihak pertama yang sering melihat asap atau api. Kelompok Masyarakat Peduli Api dapat melakukan patroli, menyampaikan peringatan, menyiapkan peralatan, dan membantu upaya awal. Namun, relawan menghadapi bahaya panas, asap, runtuhan, dan kebakaran bawah permukaan. Mereka memerlukan pelatihan, alat pelindung, asuransi, komunikasi, dan batas peran yang jelas.

Pengelolaan berbasis masyarakat efektif jika terhubung dengan pemerintah, perusahaan, dan lembaga profesional. Desa dapat menyusun aturan pembukaan lahan, peta sumber air, jalur evakuasi, serta rencana komunikasi. Pengamatan masyarakat melengkapi data satelit dan cuaca, tetapi perlu dikonfirmasi agar laporan tidak keliru dan respons dapat diarahkan dengan aman.

Pelibatan perlu adil. Masyarakat tidak seharusnya menanggung risiko dan biaya yang timbul dari operasi skala besar atau kelalaian pemegang izin. Pembagian tanggung jawab, dukungan finansial, dan akses pengaduan perlu diatur. Keterlibatan yang bermakna memperkuat kepercayaan serta menjaga kesinambungan pencegahan.

21. Teknologi dan modifikasi cuaca

Penginderaan jauh, sensor, sistem informasi geografis, pemodelan cuaca, drone, dan komunikasi digital dapat mempercepat identifikasi risiko. Sistem prediksi dapat menggabungkan ENSO-IOD, hujan, kelembapan, angin,

vegetasi, kanal, sejarah terbakar, dan aktivitas manusia. Hasil perlu disajikan dengan tingkat keyakinan dan tindakan yang disarankan. Otomasi tidak menghapus kebutuhan verifikasi lapangan dan penilaian petugas.

Operasi modifikasi cuaca dapat digunakan untuk meningkatkan hujan pada kondisi atmosfer yang mendukung dan tujuan operasional yang jelas. Efektivitasnya bergantung pada awan, kelembapan, angin, serta ketersediaan sumber daya. Modifikasi cuaca bukan pengganti pengelolaan gambut, pencegahan api, atau penegakan hukum. Evaluasi harus mencatat kondisi dasar dan memperkirakan apa yang mungkin terjadi tanpa operasi.

Teknologi pemadaman seperti pompa, sekat bakar, embung, dan peralatan pengiriman air memerlukan pemeliharaan serta latihan. Investasi teknologi harus sesuai medan dan tingkat keparahan yang mungkin terjadi. Penggunaan sistem mahal tanpa operator, akses suku cadang, atau rencana logistik berisiko tidak berfungsi saat dibutuhkan.

22. Keselamatan pemadam dan koordinasi operasi

Pemadaman api merupakan pekerjaan berisiko tinggi. Petugas dan relawan dapat terjebak perubahan arah angin, asap, api bawah tanah, pohon tumbang, atau kondisi kelelahan. Setiap operasi membutuhkan komando insiden, penilaian risiko dinamis, komunikasi radio, rencana evakuasi, pemantauan kesehatan, dan kewenangan menghentikan pekerjaan ketika kondisi tidak aman.

Koordinasi lintas lembaga menyatukan pemadam kehutanan, BPBD, TNI/Polri, pemerintah daerah, perusahaan, relawan, dan layanan kesehatan. Struktur komando perlu menjelaskan penanggung jawab, informasi situasional, prioritas perlindungan, dan logistik. Penggunaan sumber daya harus menghindari duplikasi atau kekosongan cakupan.

Pelajaran operasi perlu didokumentasikan setelah kejadian. Analisis mengidentifikasi keputusan tepat waktu, hambatan akses, ketersediaan air, komunikasi yang gagal, dan masalah keselamatan. Temuan mengarah pada pembaruan pelatihan, peralatan, dan rencana kontinjensi. Tujuannya membangun organisasi pembelajar, bukan sekadar menentukan kesalahan individual.

23. Kebijakan, tata kelola, dan penegakan hukum

Karhutla berkaitan dengan izin, tenurial, penggunaan lahan, tata ruang, dan insentif ekonomi. Kebijakan yang terfragmentasi membuat tanggung jawab pencegahan tidak jelas. Pemerintah pusat menetapkan standar dan koordinasi; pemerintah daerah mengelola kesiapsiagaan dan pengawasan lapangan; pemegang izin mengelola risiko pada wilayahnya; masyarakat berperan dalam pengamatan dan praktik lahan yang aman.

Penegakan hukum perlu berbasis bukti dan berlaku pada pelaku yang bertanggung jawab. Investigasi menggabungkan titik api, batas konsesi, cuaca, penggunaan lahan, saksi, dan bukti forensik. Sanksi harus proporsional dan transparan. Penindakan yang hanya menyasar petani kecil sementara mengabaikan aktor berkapasitas besar akan melemahkan legitimasi dan tidak mengubah sumber risiko utama.

Kebijakan perlu mempertimbangkan akar sosial-ekonomi, termasuk kemiskinan, akses lahan, konflik, dan ketersediaan alternatif. Pemberdayaan desa dapat menjadi bagian dari pencegahan bila memperbaiki peluang usaha tanpa pembakaran dan memberi akses layanan. Pendekatan restorasi sosial-ekologis menggabungkan pemulihan lingkungan dengan keadilan dan kapasitas institusi.

24. Kesehatan publik dan komunikasi risiko asap

Komunikasi kualitas udara sebaiknya mengubah pembacaan indeks menjadi tindakan. Pesan perlu menjelaskan tingkat bahaya, wilayah, kelompok paling rentan, aktivitas yang perlu dibatasi, dan lokasi layanan. Informasi harus konsisten antarinstansi dan diperbarui saat angin memindahkan asap. Sekolah, puskesmas, rumah sakit, dan pemberi kerja memerlukan protokol yang jelas.

Perlindungan warga meliputi ruang udara bersih, ventilasi dan filtrasi yang sesuai, masker partikulat yang tepat, penyediaan air minum, serta dukungan bagi pasien penyakit kronis. Masker kain biasa tidak selalu efektif untuk partikulat halus. Edukasi harus akurat, mudah dipahami, dan tidak menciptakan rasa aman palsu. Pemerintah dapat menilai keterjangkauan perlindungan bagi rumah tangga berpenghasilan rendah.

Upaya kesehatan perlu terhubung dengan pengendalian sumber. Data paparan dan kunjungan layanan kesehatan membantu memprioritaskan pemadaman dan tindakan pencegahan, tetapi tanggung jawab utama tetap mengurangi api. Kompensasi dan layanan kesehatan jangka panjang perlu dipertimbangkan bagi masyarakat yang mengalami paparan berulang.

25. Kerja sama regional dan lintas batas

Asap bergerak mengikuti sirkulasi atmosfer dan tidak berhenti di batas negara. Kerja sama regional dapat mencakup pertukaran data, peringatan dini, bantuan teknis, prosedur lintas batas, dan koordinasi diplomatik. ASEAN Agreement on Transboundary Haze Pollution menyediakan kerangka kerja sama, tetapi pelaksanaan nasional dan pencegahan lokal tetap menjadi dasar pengendalian.

Kerja sama memerlukan data yang transparan serta istilah yang seragam untuk membedakan hotspot, titik api terverifikasi, luas terbakar, emisi, dan

konsentrasi polutan. Perbedaan metode dapat menimbulkan perdebatan angka. Protokol pertukaran data dapat mengurangi keterlambatan dan memperkuat analisis bersama.

Bantuan lintas negara harus dikelola berdasarkan kebutuhan dan koordinasi pemerintah yang terdampak. Dukungan teknis tidak menggantikan tanggung jawab pemilik lahan atau negara atas pencegahan. Diplomasi lingkungan akan lebih kuat bila tindakan domestik dapat diverifikasi dan kemajuan dilaporkan secara berkala.

26. Pembelajaran dari kejadian 2015

Kebakaran 2015 menunjukkan bahwa peringatan iklim dapat disampaikan jauh sebelum puncak api, tetapi keberadaan prakiraan saja tidak menjamin tindakan. Penerjemahan informasi menjadi keputusan operasional, koordinasi pusat-daerah, kesiapan air, penegakan kewajiban pemegang izin, dan perlindungan kesehatan menentukan dampak akhir. Kesenjangan antara prediksi dan aksi merupakan area penting bagi evaluasi kebijakan.

Krisis tersebut juga mengungkap sifat nonlinier kekeringan, kontribusi gambut terdegradasi, kompleksitas penyalaan, dan dampak asap jangka panjang. Berbagai studi menggunakan satelit, pengamatan hujan, kualitas udara, emisi, serta data administratif untuk menilai mekanisme berbeda (Field et al., 2016; Fanin & van der Werf, 2017; Edwards et al., 2020). Bukti lintas disiplin memberi landasan bagi pencegahan yang lebih kuat.

Pembelajaran harus memeriksa apa yang berubah setelah peristiwa: apakah hidrologi gambut membaik, praktik pembukaan tanpa bakar meningkat, kewajiban perusahaan dipenuhi, dan kejadian berulang menurun? Tanpa indikator dan data dasar, pemerintah sulit membedakan kemajuan struktural dari variasi cuaca tahunan.

27. Pengurangan risiko sepanjang tahun

Karhutla bukan hanya masalah musim kemarau. Persiapan infrastruktur air, pemeliharaan sekat kanal, pengelolaan vegetasi, pengembangan alternatif mata pencaharian, pelatihan, dan audit lahan lebih efektif dilakukan pada musim basah. Penjadwalan tahunan harus membagi kegiatan agar sumber daya tidak terkonsentrasi pada saat api sudah terjadi.

Perusahaan dan pemerintah dapat menggunakan periode di luar musim kebakaran untuk memperbaiki akses pemadaman, mengecek pompa, menata ulang rencana konsesi, dan memperbarui peta risiko. Komunitas dapat membentuk atau melatih kelompok siaga, menyepakati larangan pembakaran, dan memperkuat mata pencaharian tanpa api.

Perencanaan sepanjang tahun mengurangi siklus kepanikan musiman. Anggaran tidak hanya dialokasikan pada operasi darurat, melainkan juga pencegahan dan pemulihan. Evaluasi tahunan menilai apakah tindakan mengurangi kerentanan dasar dan memperbaiki koordinasi.

28. Restorasi pascakebakaran

Pemulihan pascakebakaran perlu dimulai dengan penilaian tingkat kerusakan dan risiko lanjutan. Pada gambut, titik panas tersisa harus dipastikan padam; muka air dipulihkan; dan lokasi rawan erosi maupun pencemaran dipantau. Di hutan, regenerasi alami dapat didukung dengan perlindungan dari api dan gangguan lanjutan. Tidak semua lahan membutuhkan penanaman intensif; diagnosis ekologis menentukan pendekatan.

Restorasi sebaiknya melibatkan masyarakat yang bergantung pada lahan. Pemulihan penghidupan dapat meliputi usaha ramah gambut, produk hutan nonkayu, pertanian yang sesuai, atau layanan pengelolaan ekosistem. Dukungan harus didesain agar tidak mendorong pembukaan baru atau ekstraksi sumber daya yang mengurangi ketahanan.

Keberhasilan pemulihan diukur berdasarkan fungsi ekosistem, penurunan risiko api berulang, kualitas air, tutupan vegetasi, dan pemulihan manfaat sosial. Program restorasi memerlukan pendanaan multiyear karena ekosistem tidak pulih dalam satu musim anggaran.

29. Keadilan sosial dan tanggung jawab perusahaan

Keadilan lingkungan memeriksa siapa menyalakan api, siapa mendapat manfaat dari perubahan lahan, dan siapa menanggung asap serta kehilangan penghidupan. Masyarakat lokal dapat memiliki peran berbeda dari perusahaan besar, pemegang izin, atau pemerintah. Analisis harus membedakan kuasa, sumber daya, dan tanggung jawab, bukan menyalahkan satu kelompok secara seragam.

Perusahaan memiliki kapasitas untuk mencegah kebakaran pada lahan kelolanya melalui rencana operasional, penjagaan, pemeliharaan hidrologi, pengendalian sumber api, dan dukungan kepada pemasok. Kebijakan rantai pasok perlu memastikan bahwa kebakaran tidak berpindah ke pemasok tidak langsung atau lahan di luar batas yang diawasi. Audit, transparansi, dan konsekuensi kontraktual membantu memastikan komitmen berjalan.

Masyarakat membutuhkan akses informasi, saluran keluhan, bantuan hukum, dan perlindungan dari dampak kesehatan. Bila hak atas lahan dan sumber daya tidak jelas, konflik dapat meningkatkan risiko kebakaran. Penyelesaian tenurial dan konsultasi bermakna merupakan bagian dari mitigasi, bukan isu terpisah.

30. Manajemen risiko dan tata kelola organisasi

Organisasi dapat menggunakan siklus manajemen risiko: identifikasi bahaya, penilaian paparan dan kerentanan, kontrol, kesiapsiagaan, respons, pemulihan, dan pembelajaran. Rumah sakit menguji kontinuitas layanan saat

asap; pemerintah daerah menguji distribusi air dan komando api; perusahaan menilai rantai pasok dan kewajiban konsesi; sekolah menyusun prosedur jika kualitas udara memburuk.

Indikator kinerja sebaiknya mengukur hasil, seperti waktu respons, proporsi gambut dengan muka air termonitor, luas terbakar berulang, jumlah hari kualitas udara buruk, dan cakupan masyarakat yang menerima peringatan. Jumlah rapat atau pelatihan hanya menunjukkan kegiatan, bukan penurunan risiko. Pengukuran memerlukan data dasar serta pelaporan yang dapat diaudit.

Kepemimpinan menentukan apakah rencana menjadi praktik. Wewenang harus jelas; anggaran tersedia; petugas memahami prosedur; dan komunikasi dengan publik berjalan. Setelah kejadian, tinjauan pascaoperasi mencatat keputusan, hambatan, biaya, dampak, serta koreksi yang diperlukan. Organisasi belajar dari data dan pengalaman tanpa menghapus akuntabilitas.

31. Pembiayaan dan prioritas investasi

Pencegahan membutuhkan investasi rutin pada tata air, patroli, peralatan, penyuluhan, sistem informasi, dan restorasi. Biaya ini sering tidak tampak dibanding nilai kerugian akibat kebakaran besar. Analisis manfaat perlu memasukkan pengurangan emisi, kesehatan, biodiversitas, kualitas air, produktivitas, dan perlindungan penghidupan, bukan hanya biaya pemadaman yang dihindari.

Prioritas pembiayaan ditentukan melalui kombinasi bahaya, paparan, kerentanan, nilai ekologi, dan kemampuan respons. Daerah dengan gambut terdrainase, permukiman rentan, sejarah kebakaran, dan akses terbatas mungkin memerlukan dukungan lebih besar. Anggaran kontinjensi dan transfer antardaerah membantu mengelola kejadian yang melampaui kapasitas lokal.

Dana publik dan swasta perlu mengikuti prinsip transparansi, perlindungan sosial, dan integritas lingkungan. Skema karbon atau jasa lingkungan dapat membantu restorasi bila manfaat dibagikan adil dan pengukuran dapat diverifikasi. Pembiayaan tidak boleh menjadi pengganti kewajiban hukum untuk mencegah dan mengendalikan api.

32. Riset, data, dan inovasi

Penelitian karhutla perlu menghubungkan meteorologi, ekologi, kesehatan, geografi, ekonomi, dan tata kelola. Analisis citra satelit mengidentifikasi perubahan tutupan; data cuaca menjelaskan kondisi api; survei lapangan menilai bahan bakar dan kedalaman gambut; data sosial menunjukkan penggunaan lahan dan kapasitas pemadaman. Pendekatan interdisipliner mengurangi risiko kesimpulan yang berfokus pada satu penyebab.

Perluasan stasiun hujan dan sensor muka air gambut dapat memperbaiki peringatan dini. Model prediksi dievaluasi berdasarkan kemampuan memprediksi wilayah, waktu, dan tingkat risiko yang berguna bagi keputusan. Data kebakaran historis harus memiliki metadata, konsistensi klasifikasi, dan akses yang memadai. Ketidakpastian dan keterbatasan metode perlu dilaporkan secara eksplisit.

Riset inovasi juga mencakup alternatif pembukaan tanpa bakar, pengelolaan residu, sistem insentif, dan model tata kelola. Teknologi harus diuji bersama pengguna di lapangan agar sesuai kemampuan, biaya, dan budaya kerja. Hasil penelitian perlu disampaikan dalam bentuk panduan praktis, bukan hanya publikasi akademik.

33. Komunikasi publik dan literasi kebakaran

Komunikasi risiko menjelaskan bahwa El Niño dapat meningkatkan peluang musim kering, tetapi kondisi lokal dan keputusan manusia tetap menentukan

api. Pesan yang menyatakan “El Niño menyebabkan kebakaran” tanpa keterangan dapat menimbulkan fatalisme dan mengaburkan tanggung jawab. Komunikasi yang lebih akurat menguraikan peran cuaca, sumber penyalaan, kondisi lahan, serta langkah pencegahan.

Warga memerlukan informasi yang konsisten mengenai prakiraan, bahaya asap, lokasi layanan, aktivitas berisiko, dan cara melapor. Media perlu membedakan hotspot dari api terkonfirmasi dan angka luas terbakar dari target operasi. Data visual mencantumkan tanggal, sumber, metode, serta ketidakpastian agar dapat ditafsirkan dengan benar.

Literasi kebakaran dapat dikembangkan melalui sekolah, penyuluhan, pelatihan desa, dan program perusahaan. Masyarakat belajar membaca tanda bahaya dan bertindak aman, sementara institusi belajar mendengar laporan lokal. Komunikasi dua arah memperbaiki kecepatan dan ketepatan respons.

34. Agenda penelitian Indonesia

Penelitian perlu memperluas pemantauan jangka panjang pada gambut, hutan, lahan mineral, dan savana. Studi membandingkan lokasi dengan fase ENSO sama tetapi kondisi tata guna lahan berbeda dapat memisahkan kontribusi cuaca dan pengelolaan. Data vegetasi, emisi, kualitas air, kesehatan, dan penghidupan dapat digabungkan dalam kerangka analisis risiko.

Agenda lainnya adalah menguji sistem peringatan dan tindakan antisipatif: apakah prakiraan sampai ke petugas dan masyarakat, apakah ambang pemicu tepat, dan apakah tindakan menurunkan luas terbakar. Evaluasi kebijakan perlu menilai kepatuhan, penegakan, pembagian tanggung jawab, serta efektivitas alternatif tanpa bakar. Keberhasilan diukur sepanjang beberapa musim, bukan satu insiden.

Penelitian juga harus menilai konsekuensi sosial dan keadilan. Siapa yang kehilangan lahan atau akses, siapa mendapat dukungan, dan bagaimana

konflik tenurial berpengaruh terhadap api? Studi kualitatif melengkapi statistik kebakaran dengan pengalaman warga dan petugas. Etika, persetujuan, serta perlindungan data menjadi syarat penelitian yang bertanggung jawab.

35. Kesimpulan

El Niño dapat meningkatkan risiko kebakaran hutan dan lahan dengan mengurangi hujan, memanjangkan periode kering, dan mengeringkan vegetasi serta gambut. Pengaruh ini kuat dalam sejumlah kejadian besar Indonesia, tetapi tidak menjelaskan seluruh variasi kebakaran. Kebakaran besar juga mungkin terjadi pada fase ENSO lain karena IOD, gelombang atmosfer, penggunaan lahan, sumber penyalaan, dan kondisi ekologi dapat mengubah respons lokal.

Api umumnya berkaitan dengan aktivitas manusia, sedangkan luas, durasi, dan dampaknya ditentukan oleh interaksi bahan bakar, cuaca, hidrologi gambut, tata kelola, akses, serta kemampuan pemadaman. El Niño adalah penguat bahaya, bukan korek api. Kebijakan yang berfokus pada cuaca atau pemadaman saja tidak cukup untuk mengurangi kejadian berulang.

Indonesia memerlukan pendekatan pencegahan sepanjang tahun: menjaga gambut tetap basah, mengelola lanskap, menyediakan alternatif tanpa bakar, memperkuat pemantauan dan peringatan dini, menegakkan tanggung jawab secara adil, melindungi kesehatan, serta memulihkan ekosistem. Keberhasilan dinilai dari berkurangnya api dan asap, pulihnya fungsi ekologis, dan meningkatnya kapasitas masyarakat serta institusi. Kesiapsiagaan berbasis bukti memungkinkan negara menghadapi El Niño tanpa menormalisasi kerusakan yang dapat dicegah.

45. Membedakan bahaya, paparan, dan kerentanan

Analisis risiko karhutla menjadi lebih berguna apabila membedakan bahaya, paparan, dan kerentanan. Bahaya mencakup keadaan yang memungkinkan api menyala dan menyebar, seperti kekeringan, angin, serta bahan bakar kering. Paparan menunjukkan siapa dan apa yang berada pada jalur dampak: penduduk, sekolah, rumah sakit, kebun, jalan, habitat satwa, atau instalasi ekonomi. Kerentanan menjelaskan seberapa besar pihak yang terpapar dapat mengalami kerugian, termasuk kemampuan memperoleh informasi, berpindah, melindungi kesehatan, dan memulihkan penghidupan.

Dua desa dengan hujan sama-sama rendah dapat menghadapi risiko yang berbeda. Desa yang memiliki gambut terdrainase, riwayat pembakaran, akses pemadaman terbatas, dan layanan kesehatan jauh lebih rentan daripada daerah dengan hidrologi terjaga dan koordinasi aktif. Peta bahaya yang hanya memakai curah hujan tidak menggambarkan perbedaan ini. Penilaian berlapis dapat membantu pemerintah menentukan lokasi patroli, distribusi pompa, sarana komunikasi, perlindungan kelompok rentan, serta dukungan mata pencaharian sebelum krisis terjadi.

Kerangka tersebut juga mencegah kesimpulan bahwa seluruh wilayah yang kering akan terbakar atau semua masyarakat di kawasan rawan bertanggung jawab setara. Risiko merupakan sifat hubungan antara proses fisik dan kondisi sosial. Karena itu, intervensi perlu disesuaikan: mengurangi sumber penyalaan, memulihkan air, mengelola vegetasi, memperbaiki akses pemadam, serta mengurangi paparan melalui peringatan kesehatan. Evaluasi sebaiknya memeriksa apakah risiko turun pada kelompok paling rentan, bukan hanya apakah jumlah hotspot berkurang.

46. Gambut sebagai sistem hidrologi dan sosial-ekologis

Gambut tropis terbentuk melalui akumulasi bahan organik dalam kondisi jenuh air selama waktu yang panjang. Sistem ini menyimpan karbon dan air, mendukung habitat khusus, dan memberi ruang hidup serta sumber penghidupan bagi masyarakat. Drainase kanal untuk pertanian atau perkebunan menurunkan muka air, mempercepat pengeringan, meningkatkan risiko oksidasi, dan dapat membuat lapisan organik lebih mudah terbakar saat kemarau. Kebakaran pada gambut dapat merambat di bawah permukaan sehingga tidak selalu tampak sebagai nyala tinggi, tetapi tetap sulit ditemukan dan dipadamkan.

Menjaga muka air bukan hanya soal memasang sekat kanal. Efektivitasnya bergantung pada kondisi topografi, jaringan kanal, pasang surut, curah hujan, pemeliharaan bangunan air, hak pengelolaan, dan kesepakatan antar pengguna. Sekat yang rusak, terlalu sedikit, atau ditempatkan tanpa memahami aliran dapat memberi manfaat terbatas. Pemantauan sumur, pengukuran muka air, pemeriksaan vegetasi, dan keterlibatan warga membantu memastikan pembasahan kembali berlangsung sesuai kebutuhan setempat.

Pengelolaan gambut juga perlu berangkat dari lanskap utuh. Kanal yang melintasi batas administrasi atau konsesi dapat mengubah kondisi air di area yang lebih luas. Oleh sebab itu, koordinasi hulu-hilir, pengelolaan berbasis kesatuan hidrologis gambut, dan kesepakatan mengenai penggunaan lahan penting untuk mencegah pemindahan risiko dari satu lokasi ke lokasi lain. Restorasi perlu disertai pilihan ekonomi yang layak, agar perlindungan ekosistem dapat berjalan bersama keamanan penghidupan.

47. Dari deteksi satelit menuju keputusan lapangan

Satelit membantu menemukan anomali panas, memantau asap, dan mengamati perubahan tutupan lahan dalam skala luas. Namun, setiap produk memiliki keterbatasan resolusi, waktu lintasan, tutupan awan, ambang deteksi, dan kemungkinan alarm palsu. Hotspot dapat muncul akibat sumber panas nonkebakaran atau tidak menangkap api kecil yang tertutup awan. Karena itu, interpretasi perlu menggabungkan waktu pengamatan, kualitas kepercayaan, kondisi meteorologi, riwayat api, dan pemeriksaan lapangan.

Rangkaian operasional yang baik menghubungkan peringatan dengan tugas yang jelas. Informasi dari BMKG dan pemantauan satelit diterima petugas daerah, diterjemahkan menjadi tingkat kesiagaan, kemudian memicu patroli, inspeksi muka air, komunikasi dengan desa dan pengelola lahan, atau penempatan sumber daya. Jika hanya disampaikan sebagai peta tanpa ambang keputusan, informasi tidak otomatis menurunkan risiko. Prosedur perlu menjelaskan siapa menerima pesan, berapa lama untuk merespons, bagaimana melaporkan temuan, dan siapa yang dapat mengerahkan dukungan.

Peta dapat pula digunakan untuk menyusun rencana kontinjensi: lokasi sumber air, jalan masuk, gambut dalam, fasilitas kesehatan, sekolah, kelompok lansia, dan jalur evakuasi. Data harus diperbarui serta dibagikan dengan menjaga keselamatan pelapor dan privasi. Evaluasi sesudah musim kebakaran dapat menilai apakah alarm tepat waktu, rute dapat dilalui, peralatan bekerja, dan petugas memiliki informasi yang cukup. Ukuran kinerja tersebut lebih operasional daripada sekadar menghitung jumlah peta atau pesan peringatan yang diterbitkan.

48. Perencanaan pertanian dan ketahanan pangan

Kekeringan terkait El Niño dapat memengaruhi kalender tanam, ketersediaan air irigasi, produktivitas, harga pakan, dan akses pangan. Dampaknya berbeda menurut komoditas, jenis tanah, sumber air, varietas, serta posisi petani dalam rantai pasok. Apabila pembukaan lahan dilakukan dengan api, risiko meningkat baik bagi kebun yang dibuka maupun lanskap di sekitarnya. Pencegahan karhutla karenanya perlu dihubungkan dengan layanan penyuluhan, perencanaan air, dan perlindungan produksi pangan.

Adaptasi pertanian dapat mencakup penyesuaian jadwal tanam berdasarkan prakiraan musiman, penggunaan varietas yang sesuai, perbaikan efisiensi irigasi, penampungan air, perlindungan tanah, diversifikasi tanaman, serta akses terhadap informasi harga dan bantuan. Tidak semua praktik cocok di setiap wilayah; keputusan harus mempertimbangkan kalender lokal dan hak atas sumber air. Penyuluh, kelompok tani, pemerintah desa, dan lembaga meteorologi perlu menyampaikan informasi dengan bahasa sederhana, rentang ketidakpastian yang jujur, serta saran tindakan yang dapat dilaksanakan.

Bantuan pascakekeringan penting, tetapi insentif pencegahan dapat mengurangi kebutuhan pemulihan yang mahal. Dukungan alat pembukaan tanpa bakar, tenaga kerja, pembiayaan mikro, dan akses pasar dapat membuat alternatif lebih realistis daripada larangan yang tidak disertai solusi. Program juga perlu memeriksa distribusi manfaat agar petani kecil tidak menanggung biaya transisi sendirian. Dengan cara itu, ketahanan pangan, pencegahan kebakaran, dan adaptasi iklim dapat saling memperkuat.

49. Dampak asap pada kesehatan dan pelayanan dasar

Asap kebakaran mengandung partikulat halus dan beragam senyawa hasil pembakaran yang dapat mengiritasi mata dan saluran napas serta

memperburuk penyakit yang telah ada. Risiko ditentukan oleh konsentrasi, lamanya paparan, aktivitas fisik, ventilasi ruang, kondisi kesehatan, dan usia. Anak-anak, lansia, ibu hamil, pekerja luar ruang, serta orang dengan penyakit pernapasan atau kardiovaskular membutuhkan perlindungan khusus. Karena karakter asap berbeda antar lokasi dan jenis bahan bakar, paparan sebaiknya dipantau dengan instrumen yang sesuai dan informasi kesehatan resmi.

Pelayanan kesehatan perlu memiliki rencana sebelum indeks kualitas udara memburuk. Fasilitas dapat menyiapkan ruang lebih bersih, persediaan obat dan alat pelindung, panduan triase, saluran komunikasi dengan sekolah serta puskesmas, dan prosedur bagi pasien yang memerlukan rujukan. Sekolah dan tempat kerja dapat menyesuaikan kegiatan luar ruang berdasarkan kondisi setempat. Jika tersedia, ruang dengan filtrasi udara dapat mengurangi paparan dalam ruangan, tetapi kebutuhan ventilasi dan keselamatan bangunan tetap harus diperhatikan.

Komunikasi risiko sebaiknya memberi arahan konkret: kapan mengurangi aktivitas luar ruang, bagaimana mengurangi masuknya asap ke ruangan, kapan mencari pertolongan, serta di mana memperoleh informasi terbaru. Pesan harus mudah diakses masyarakat terpencil dan penyandang disabilitas. Kebijakan kesehatan perlu menghindari kesan bahwa perlindungan individu menggantikan kewajiban mengendalikan sumber kebakaran. Prioritas pertama tetap mengurangi pembakaran dan memadamkan api sedini mungkin, disertai dukungan untuk orang yang sudah terpapar.

50. Perencanaan operasi dan keselamatan pemadam

Operasi pemadaman di lahan terbuka dan gambut memiliki risiko yang berbeda. Petugas dapat menghadapi panas, asap, kelelahan, dehidrasi, jarak pandang rendah, tanah tidak stabil, api bawah permukaan, serta akses air yang terbatas. Rencana keselamatan harus menyertakan penilaian bahaya

sebelum penugasan, alat komunikasi, pengawasan kondisi fisik, alat pelindung yang layak, prosedur evakuasi, batas durasi kerja, dan akses pertolongan medis. Peralatan saja tidak cukup bila tidak ada pelatihan dan pemeliharaan.

Komando insiden yang jelas menyatukan petugas pemerintah, pemadam perusahaan, relawan, dan masyarakat. Pembagian peran perlu menetapkan siapa memimpin, siapa mencatat kondisi api, siapa mengatur logistik, dan bagaimana perubahan strategi disampaikan. Peta situasi harus memuat titik api, arah angin, sumber air, jalur aman, infrastruktur, serta lokasi kelompok masyarakat. Koordinasi lintas wilayah diperlukan ketika api atau asap melintasi batas administrasi, sementara protokol komunikasi perlu mencegah informasi yang tidak terverifikasi mengganggu operasi.

Pemadaman langsung tidak selalu menjadi pilihan aman atau efektif. Kondisi bahan bakar, jenis kebakaran, kemampuan personel, dan cuaca harus dinilai. Dalam beberapa keadaan, strategi defensif untuk melindungi warga dan aset dapat menjadi prioritas. Setelah penugasan, evaluasi keselamatan memeriksa cedera, hampir celaka, kelelahan, kegagalan alat, dan hambatan komando. Pembelajaran ini harus digunakan untuk memperbaiki operasi berikutnya tanpa menyalahkan pelapor yang mengungkap risiko.

51. Tata kelola, pertanggungjawaban, dan keadilan

Pengendalian karhutla memerlukan pembagian tanggung jawab yang dapat dipahami publik. Pemerintah pusat dan daerah mengatur kebijakan, pengawasan, layanan darurat, serta penegakan; pemegang izin wajib mengelola risiko pada wilayahnya; masyarakat dan pemilik lahan memerlukan dukungan untuk menerapkan praktik aman. Tanggung jawab ini tidak identik: besar kewajiban perlu sebanding dengan kendali, kapasitas, dan manfaat yang diperoleh. Penegakan hukum perlu didasarkan pada bukti, prosedur yang adil, dan transparansi.

Ketidakjelasan hak lahan, tumpang tindih izin, sengketa batas, dan akses terbatas terhadap mekanisme pengaduan dapat memperumit pencegahan. Pemetaan partisipatif dan mediasi yang dapat dipercaya membantu memperjelas penggunaan lahan dan tanggung jawab. Mekanisme pengaduan perlu melindungi pelapor dari intimidasi, memberi tindak lanjut yang terukur, dan menyampaikan hasil penyelidikan. Pemeriksaan kasus harus membedakan bukti penyalaan, tanggung jawab pengelolaan, dan kondisi cuaca yang meningkatkan penyebaran api.

Keadilan juga menyangkut siapa membayar pencegahan, siapa menanggung dampak asap, dan siapa menerima dukungan pemulihan. Masyarakat lokal sering hidup dekat area terbakar dan dapat kehilangan kesehatan, mata pencaharian, atau akses terhadap lahan. Program bantuan dan restorasi perlu dirancang bersama warga, mengakui pengetahuan lokal, dan memberi manfaat jangka panjang. Akuntabilitas yang efektif mengurangi peluang kebakaran berulang sekaligus meningkatkan kepercayaan terhadap lembaga.

52. Restorasi dan pemulihan pascakebakaran

Berhentinya api tidak berarti ekosistem serta masyarakat segera pulih. Tanah gambut yang terbakar dapat mengalami perubahan struktur dan hidrologi; hutan dapat kehilangan pohon, tempat berlindung, dan sumber pakan; warga mungkin masih menghadapi gangguan kesehatan, penghasilan, dan kegiatan belajar. Penilaian pascakebakaran perlu menentukan tingkat kerusakan, penyebab, ancaman erosi atau banjir, kondisi air, dan kebutuhan kelompok yang terdampak. Hasil penilaian menjadi dasar prioritas pemulihan.

Restorasi ekologis dapat meliputi pembasahan kembali, regenerasi alami, penanaman spesies lokal bila dibutuhkan, pengendalian spesies invasif, dan perlindungan dari gangguan lanjutan. Pilihan intervensi perlu mengikuti kondisi tapak; penanaman seragam tanpa pemahaman hidrologi dan ekologi

setempat dapat menghasilkan keberhasilan rendah. Pemantauan beberapa tahun diperlukan untuk melihat apakah muka air, tutupan vegetasi, fungsi habitat, dan mata pencaharian membaik. Indikator keberhasilan sebaiknya ditentukan sejak awal bersama masyarakat dan pengelola.

Pemulihan sosial mencakup layanan kesehatan, dukungan pendidikan, pemulihan sumber air dan penghidupan, serta proses penyelesaian kerugian. Bantuan darurat sebaiknya tidak mengunci warga ke praktik yang meningkatkan risiko berikutnya. Dana pemulihan dapat dikaitkan dengan rencana pengurangan risiko, pemeliharaan infrastruktur air, dan penguatan kelompok siaga. Dengan menghubungkan pemulihan dan pencegahan, kejadian kebakaran menjadi kesempatan untuk memperbaiki faktor penyebab yang mendasar.

53. Perubahan iklim jangka panjang dan risiko kebakaran

El Niño merupakan variasi iklim antar-tahunan; perubahan iklim antropogenik mengubah kondisi latar yang lebih panjang. Keduanya dapat berinteraksi, tetapi tidak boleh disamakan. Pemanasan meningkatkan suhu dasar dan dapat memengaruhi penguapan serta kadar air bahan bakar. Perubahan distribusi hujan, variasi regional, perubahan tutupan lahan, dan dinamika atmosfer juga memengaruhi bahaya kebakaran. Atribusi untuk suatu kejadian perlu dilakukan dengan metode yang membandingkan kondisi aktual dan dunia kontrafaktual, bukan hanya menyimpulkan bahwa satu musim panas disebabkan oleh perubahan iklim.

Perencanaan jangka panjang sebaiknya menguji beberapa skenario iklim dan tata guna lahan. Infrastruktur pemantauan, sistem peringatan, cadangan air, standar bangunan, akses pemadam, serta desain restorasi harus berfungsi dalam rentang kondisi yang lebih luas daripada satu musim normal. Pembaruan berkala dibutuhkan karena prakiraan dan bukti ilmiah

berkembang. Fleksibilitas ini membantu mencegah investasi yang hanya cocok pada kondisi historis.

Pengurangan emisi dari kebakaran dan perlindungan gambut dapat memberi manfaat bagi iklim sekaligus kualitas udara, biodiversitas, dan penghidupan. Namun, kebijakan iklim yang berbasis target karbon harus tetap memperhatikan hak masyarakat, manfaat lokal, dan kualitas ekosistem. Menghindari kebakaran bukan hanya upaya mitigasi emisi; ia juga mengurangi kerusakan ekologis dan paparan kesehatan. Sinergi tersebut membuat pencegahan karhutla relevan dalam agenda adaptasi dan pembangunan berkelanjutan.

54. Kerangka indikator untuk menilai keberhasilan

Program pengendalian sering dinilai dari keluaran administratif seperti jumlah patroli, peralatan, sosialisasi, atau sekat kanal yang dibangun. Keluaran itu penting, tetapi tidak membuktikan bahwa risiko turun. Kerangka evaluasi perlu membedakan masukan, kegiatan, hasil langsung, dan dampak. Misalnya, patroli merupakan kegiatan; waktu verifikasi laporan adalah hasil operasional; penurunan peluang api meluas adalah hasil; berkurangnya hari berasap dan kerusakan ekosistem merupakan dampak yang lebih luas.

Indikator sebaiknya menggabungkan ukuran iklim dan ekologi dengan tata kelola serta kesejahteraan. Ukuran yang dapat dipertimbangkan meliputi lama periode kering, muka air gambut, waktu respons terhadap laporan, luas terbakar terverifikasi, jumlah kejadian berulang di lokasi yang sama, paparan partikulat, kesiapan fasilitas kesehatan, keberhasilan alternatif tanpa bakar, serta persepsi masyarakat atas keadilan dan kepercayaan. Tiap indikator memerlukan definisi konsisten, sumber data, frekuensi pembaruan, dan penanggung jawab.

Perbandingan antar tahun harus mempertimbangkan perbedaan kondisi ENSO, IOD, durasi musim kering, cakupan pemantauan, dan perubahan metodologi. Angka hotspot dan luas terbakar tidak dapat dipertukarkan. Evaluasi yang transparan melaporkan ketidakpastian dan kekosongan data, lalu mengaitkan temuan dengan keputusan anggaran serta perbaikan prosedur. Dengan demikian, pembelajaran menjadi bagian dari tata kelola rutin, bukan laporan yang dibaca setelah musim kebakaran berakhir.

55. Keragaman ekologi dan dampak pada satwa liar

Kebakaran mengubah habitat dengan cara yang bergantung pada tipe ekosistem, intensitas api, frekuensi kejadian, dan kondisi sebelum terbakar. Api dapat menghilangkan tutupan, merusak sarang dan tempat berlindung, mengganggu sumber pakan, serta mengubah komposisi tumbuhan. Pada gambut, pembakaran bawah permukaan dapat memengaruhi akar dan bahan organik lebih lama daripada yang terlihat dari bekas hangus di permukaan. Satwa yang mampu berpindah mungkin mencari habitat lain, tetapi pergerakan itu dapat meningkatkan persaingan atau konflik dengan manusia.

Dampak ekologis tidak selalu seragam. Sebagian vegetasi mungkin pulih setelah kebakaran tertentu, sementara spesies yang memiliki wilayah jelajah terbatas atau bergantung pada hutan utuh lebih rentan. Kebakaran berulang dalam waktu pendek dapat mencegah regenerasi dan menggeser ekosistem menuju keadaan yang lebih terbuka dan mudah terbakar. Pemantauan biodiversitas karena itu perlu melihat lintasan pemulihan, bukan hanya luas lahan yang tampak terbakar pada satu waktu.

Perencanaan pencegahan dapat memasukkan koridor satwa, kawasan konservasi, habitat penting, dan lokasi konflik manusia-satwa ke dalam peta respons. Setelah kebakaran, penilaian ekologis membantu menentukan apakah regenerasi alami cukup atau diperlukan tindakan pemulihan

tambahan. Pengelolaan harus mengurangi penyalaan dan menjaga konektivitas habitat, serta melibatkan masyarakat yang memiliki pengetahuan lokal tentang perubahan satwa dan lanskap.

56. Asap lintas batas dan kerja sama kawasan

Asap dari kebakaran dapat bergerak mengikuti angin dan sirkulasi atmosfer, sehingga kualitas udara memburuk jauh dari sumber api. Dampak lintas batas pernah menjadi isu diplomatik dan kesehatan regional, tetapi pola transportasi asap berubah mengikuti lokasi kebakaran, ketinggian emisi, kondisi cuaca, dan durasi kejadian. Karena itu, laporan kualitas udara regional perlu membedakan pengukuran di lokasi dari hasil pemodelan transportasi dan mengomunikasikan tingkat ketidakpastian secara terbuka.

Kerja sama kawasan dapat mendukung pertukaran prakiraan, informasi titik api, data kualitas udara, serta pengalaman pengendalian. Mekanisme ini bermanfaat ketika asap mulai bergerak lintas negara atau ketika kejadian membutuhkan dukungan teknis. Namun kerja sama internasional tidak menggantikan tanggung jawab nasional dan lokal untuk mengurangi penyalaan dan mengendalikan api di sumbernya. Pencegahan di tingkat lanskap tetap menjadi cara paling langsung untuk mengurangi dampak terhadap tetangga regional.

Komunikasi lintas negara sebaiknya memakai definisi data yang sebanding, memperbarui informasi secara berkala, dan memiliki jalur kontak yang aktif sebelum krisis. Pertukaran pengetahuan mengenai pemantauan gambut, perlindungan kesehatan, dan kesiapsiagaan masyarakat dapat memperkuat kapasitas bersama. Kemitraan akan lebih efektif bila disertai kepercayaan, transparansi metodologi, dan penghormatan terhadap konteks sosial setempat.

57. Pembiayaan pencegahan dan insentif ekonomi

Biaya pencegahan sering tersebar di antara pemerintah, pengelola lahan, masyarakat, dan sektor kesehatan, sedangkan manfaatnya dinikmati wilayah yang lebih luas. Ketimpangan ini dapat menyebabkan investasi pencegahan kurang dari kebutuhan. Perencanaan anggaran perlu menilai biaya siklus penuh: pemetaan, pemeliharaan sekat kanal, operasi patroli, latihan, dukungan alat tanpa bakar, layanan kesehatan, serta pemulihan. Belanja yang hanya meningkat saat keadaan darurat cenderung tidak membangun kemampuan jangka panjang.

Instrumen ekonomi dapat mendorong perilaku yang mengurangi risiko bila desainnya transparan dan tepat sasaran. Dukungan teknis atau pembiayaan untuk peralatan pembukaan lahan tanpa bakar, pembayaran untuk jasa pengelolaan ekosistem, dan skema asuransi dapat membantu mengatasi hambatan investasi awal. Insentif perlu menghindari pembayaran untuk kegiatan yang seharusnya menjadi kewajiban dasar pemegang izin, serta memastikan bahwa manfaat diterima kelompok yang benar-benar berkontribusi dan menanggung biaya.

Keputusan pembiayaan dapat menggunakan informasi risiko musiman untuk mengatur cadangan operasi dan prioritas daerah, tetapi harus menjaga pendanaan untuk pencegahan sepanjang tahun. Audit terbuka dan evaluasi hasil membantu mengurangi pengeluaran yang hanya mengukur jumlah aset dibeli. Investasi yang kuat menggabungkan infrastruktur, kemampuan manusia, pemeliharaan, data yang dapat digunakan, serta mekanisme akuntabilitas sehingga sumber daya tetap berfungsi melewati satu musim El Niño.

58. Peran desa, pengetahuan lokal, dan kesiapsiagaan

Masyarakat desa sering menjadi pihak pertama yang melihat api kecil, perubahan muka air, atau kondisi angin yang membuat pemadaman berbahaya. Pengetahuan tentang jalur masuk, sumber air, penggunaan lahan, serta sejarah lokasi dapat melengkapi pengamatan satelit. Kelompok siaga yang terlatih dapat menghubungkan laporan dengan petugas, menyebarkan peringatan, dan membantu perlindungan warga. Peran ini perlu disertai pengakuan, pelatihan, perlengkapan, perlindungan keselamatan, dan mekanisme koordinasi yang jelas.

Kesiapsiagaan berbasis masyarakat perlu dibangun melalui latihan rutin yang melibatkan perempuan, pemuda, kelompok adat, penyandang disabilitas, dan warga yang tinggal jauh dari pusat desa. Rencana desa dapat menetapkan saluran laporan, titik kumpul, jalur evakuasi, penanggung jawab komunikasi, lokasi alat pemadam, dan prosedur bagi warga yang memerlukan bantuan. Simulasi sederhana memungkinkan peserta mengenali hambatan sebelum situasi nyata terjadi, misalnya sinyal telepon yang tidak stabil atau jalan yang terputus.

Pengetahuan lokal harus dipadukan dengan bukti ilmiah secara timbal balik. Informasi prakiraan membantu memperkirakan risiko, sementara pengalaman warga dapat menunjukkan kondisi tapak yang tidak tertangkap peta. Program tidak boleh membebankan tanggung jawab besar kepada relawan tanpa dukungan finansial dan perlindungan. Kesiapsiagaan akan lebih tahan lama apabila warga terlibat dalam perencanaan, pengambilan keputusan, pemantauan hasil, dan pembagian manfaat.

59. Prinsip komunikasi risiko yang dapat ditindaklanjuti

Informasi tentang El Niño dan karhutla harus diterjemahkan dari indikator iklim menjadi pilihan tindakan. Masyarakat, petugas, sekolah, rumah sakit, dan

pengelola lahan membutuhkan jenis pesan yang berbeda, tetapi semuanya perlu menjelaskan apa yang diketahui, apa yang belum pasti, kapan informasi berlaku, dan tindakan apa yang disarankan. Istilah teknis tanpa penjelasan dapat menyulitkan pengguna menentukan apakah mereka perlu memeriksa air, mengubah jadwal, meningkatkan patroli, atau melindungi kelompok rentan.

Komunikasi probabilistik tidak seharusnya menimbulkan rasa aman palsu saat peluang kebakaran dinilai rendah. Risiko lokal tetap mungkin muncul karena sumber penyalaan dan kondisi penggunaan lahan. Sebaliknya, peringatan tinggi tidak berarti api pasti terjadi pada setiap lokasi. Pesan yang baik membedakan peluang dari kepastian, menyertakan rentang waktu dan wilayah, serta menyediakan langkah persiapan yang proporsional. Pembaruan tepat waktu membantu menjaga kepercayaan ketika prakiraan berubah.

Pemerintah dapat menyampaikan informasi melalui radio lokal, pesan telepon, kanal digital, pertemuan desa, dan petugas lapangan, dengan bahasa serta format yang mudah diakses. Satu sumber informasi resmi membantu mengurangi kebingungan, sementara pelaporan warga dan jurnalisme lokal memperluas deteksi. Komunikasi perlu dipantau melalui umpan balik: apakah pesan diterima, dipahami, dipercaya, dan menghasilkan tindakan yang sesuai. Keberhasilan bukan banyaknya siaran, melainkan perubahan kesiapan dan pengurangan paparan.

60. Pembelajaran lintas sektor dan perbaikan berkelanjutan

Karhutla tidak dapat ditangani sebagai urusan satu instansi karena unsur penyebab dan dampaknya melintasi mandat. Lembaga meteorologi menyediakan informasi iklim, pemerintah daerah mengoordinasikan kesiapsiagaan, pengelola lahan mengendalikan sumber bahaya pada areanya, petugas kesehatan mengurangi dampak paparan, dan masyarakat mendeteksi

perubahan lokal. Tanpa prosedur berbagi data dan pembagian tugas, setiap pihak mungkin bekerja tetapi celah koordinasi tetap membuka ruang bagi api berkembang. Forum lintas sektor sebelum musim kering dapat menyepakati pemicu tindakan, narahubung, dan tata cara dukungan bersama.

Pembelajaran antar musim perlu menggabungkan catatan kejadian dengan evaluasi kebijakan. Setelah musim berakhir, tim dapat menelaah kapan kondisi kering mulai muncul, apakah informasi sampai kepada pengguna, seberapa cepat api diverifikasi, bagaimana sumber daya dialokasikan, serta apakah kelompok rentan terlindungi. Analisis perlu mencakup kejadian kecil yang berhasil dicegah supaya lembaga memahami faktor keberhasilan, bukan hanya menyelidiki kebakaran besar. Temuan sebaiknya disusun dalam format yang dapat ditindaklanjuti dan dikaitkan dengan anggaran serta pembaruan rencana kontinjensi.

Perbaikan berkelanjutan memerlukan data yang dapat dibandingkan dari tahun ke tahun dan keterbukaan mengenai batas data. Perubahan metode satelit, ketersediaan pengamatan lapangan, atau definisi hotspot dapat mengubah statistik tanpa perubahan nyata pada kondisi kebakaran. Dokumentasi metadata dan pengarsipan membantu peneliti serta pemerintah menilai tren secara tepat. Dengan evaluasi yang rutin dan partisipasi publik, pengalaman setiap musim memperkuat kemampuan menghadapi musim berikutnya, termasuk ketika El Niño dipadukan dengan anomali iklim lain atau kondisi sosial yang berubah.

61. Menyatukan strategi lokal dan nasional

Strategi nasional memberikan standar, sumber daya, dan arah koordinasi, sedangkan keputusan operasional harus menyesuaikan karakter lanskap. Kabupaten dengan gambut luas memerlukan fokus pada tata air dan keselamatan pemadaman bawah permukaan; wilayah dengan pertanian lahan

kering mungkin lebih membutuhkan dukungan pembukaan tanpa bakar, jadwal tanam, dan patroli pada batas kebun. Standar bersama untuk pelaporan kejadian, keselamatan, dan pertukaran data tetap penting agar dukungan lintas daerah dapat bergerak cepat tanpa menghapus kebutuhan lokal.

Pemerintah daerah dapat menyusun rencana musiman yang mengaitkan prakiraan hujan dan kekeringan dengan lokasi prioritas, kapasitas personel, kondisi peralatan, ketersediaan air, layanan kesehatan, serta kebutuhan komunikasi desa. Rencana perlu diuji melalui simulasi, kemudian disesuaikan dengan hasil verifikasi lapangan. Pemerintah pusat dapat mengisi kekurangan sumber daya dan membantu koordinasi lintas wilayah, sementara organisasi masyarakat dan sektor swasta turut menjalankan kewajiban yang telah disepakati. Pembagian ini membuat respons lebih terarah dan menghindari keterlambatan karena menunggu instruksi yang tidak jelas.

Sistem yang tangguh menggabungkan tindakan sebelum, selama, dan sesudah kejadian. Sebelum musim kering, pencegahan dan kesiapan dijalankan; saat kebakaran terjadi, keselamatan warga dan pengendalian api menjadi prioritas; setelahnya, pemulihan kesehatan, penghidupan, dan ekosistem diikuti evaluasi penyebab. Siklus tersebut menjaga perhatian publik dan anggaran tidak hanya muncul ketika asap telah menyebar. Dengan demikian, adaptasi terhadap El Niño menjadi bagian dari tata kelola rutin dan pembangunan yang mengurangi kerentanan secara bertahap.

62. Perbedaan risiko antarwilayah dan skala intervensi

Indonesia memiliki keragaman musim, topografi, vegetasi, dan tata guna lahan yang besar. Sebagian wilayah mengalami musim kering yang lebih nyata, sementara daerah lain memiliki pola hujan yang tidak sepenuhnya mengikuti kalender monsun. Pulau besar, pesisir, lembah, dan kawasan

pegunungan juga merespons sirkulasi atmosfer dengan cara berbeda. Karena itu, sinyal El Niño pada skala Pasifik perlu ditafsirkan bersama kondisi lokal agar tidak menghasilkan generalisasi bahwa seluruh kepulauan mengalami defisit hujan yang sama pada waktu yang sama.

Prioritas pencegahan perlu ditentukan berdasarkan karakter tempat. Kawasan dengan gambut tebal dan kanal memerlukan pemantauan muka air serta koordinasi hidrologi; wilayah hutan kering memerlukan perhatian pada akumulasi bahan bakar dan angin; kawasan pertanian membutuhkan dukungan pengelolaan sisa panen dan metode pembukaan lahan; permukiman dekat area terbakar membutuhkan rencana kesehatan dan evakuasi. Penilaian seperti ini menyatukan peta bahaya, paparan warga, keberadaan infrastruktur, dan kemampuan respons.

Pemerintah daerah dapat membangun profil risiko yang menggabungkan catatan kejadian, pengetahuan warga, pengamatan iklim, dan citra satelit. Profil tersebut tidak perlu rumit, tetapi harus dapat diperbarui serta digunakan untuk keputusan anggaran dan kesiagaan. Pembelajaran dari satu provinsi dapat diadaptasi ke tempat lain setelah diuji terhadap kondisi biofisik dan kelembagaan setempat. Pendekatan ini menjaga konsistensi standar nasional sekaligus mengakui keragaman kebutuhan operasional.

63. Penghidupan, ekonomi lokal, dan pilihan tanpa bakar

Bagi sebagian rumah tangga, api dipandang sebagai cara cepat dan murah untuk membersihkan lahan, terutama ketika akses terhadap alat, tenaga kerja, dan pembiayaan terbatas. Kebiasaan tersebut tidak berarti semua pembakaran dapat dibenarkan atau bahwa pelaku memiliki tanggung jawab yang sama. Analisis pencegahan perlu memahami biaya nyata yang dihadapi petani dan pengelola lahan, aturan yang berlaku, kepastian tenurial, serta

ketersediaan alternatif. Tanpa pemahaman ini, larangan semata dapat mendorong praktik berisiko menjadi tersembunyi dan sulit diawasi.

Metode tanpa bakar mencakup pemanfaatan residu, pencacahan, pengomposan, pengolahan mekanis, dan penyesuaian pola tanam. Kelayakannya tergantung pada luas lahan, jenis tanaman, kondisi tanah, ketersediaan tenaga, mesin, pasar, dan waktu. Program bantuan perlu menawarkan pilihan yang sesuai, bukan satu paket seragam. Pelatihan praktis, akses sewa alat, kelompok layanan bersama, dan pendampingan teknis dapat mengurangi hambatan awal serta membantu petani menghitung manfaat ekonomi jangka menengah.

Insentif pencegahan akan lebih berkelanjutan jika memberikan nilai bagi pengelolaan yang menjaga air dan vegetasi. Pemerintah dan pembeli hasil pertanian dapat mendorong standar produksi yang mengurangi penggunaan api sambil memberi dukungan yang dapat dijangkau pelaku kecil. Mekanisme evaluasi perlu memeriksa apakah alternatif benar-benar tersedia, apakah penghasilan rumah tangga tetap terjaga, dan apakah kebakaran menurun. Perlindungan lingkungan yang disertai pilihan ekonomi lebih berpeluang menjadi praktik rutin.

64. Kesiapan layanan publik dan kesinambungan pendidikan

Kebakaran besar dan asap dapat mengganggu sekolah, transportasi, layanan administrasi, serta akses ke pasar. Gangguan pendidikan memiliki akibat yang melampaui hari ketika sekolah ditutup, khususnya bagi siswa yang memiliki akses terbatas ke pembelajaran jarak jauh. Pemerintah daerah dapat memasukkan kualitas udara dan informasi kesehatan ke dalam rencana kesinambungan pendidikan, menetapkan ambang keputusan yang mengikuti panduan resmi, dan menyiapkan cara belajar alternatif yang tidak memperlebar kesenjangan digital.

Fasilitas publik perlu menilai kerentanan bangunan terhadap asap, menyiapkan prosedur pengurangan paparan, dan menetapkan jalur komunikasi dengan masyarakat. Puskesmas, rumah sakit, sekolah, terminal, dan pusat layanan warga mempunyai kebutuhan berbeda. Kesiapan dapat mencakup filter udara yang dirawat, ruang aman, alat komunikasi cadangan, pasokan air, serta daftar kontak darurat. Pemeriksaan rutin penting supaya peralatan yang dibeli sebelum musim kering tetap bekerja saat dibutuhkan.

Kesinambungan layanan membutuhkan koordinasi lintas sektor dan dukungan bagi pekerja garis depan. Petugas kesehatan, guru, relawan, pemadam, dan aparat desa menghadapi tekanan kerja yang meningkat selama krisis. Jadwal kerja, akses perlindungan, dan dukungan psikososial membantu menjaga kapasitas layanan. Setelah kondisi membaik, penilaian dampak pada siswa, pasien, dan pengguna layanan dapat menunjukkan kebutuhan pemulihan yang mungkin tidak terlihat dari data kebakaran.

65. Mengubah prakiraan menjadi tindakan antisipatif

Prakiraan iklim memberikan gambaran tentang kemungkinan kondisi beberapa pekan atau bulan mendatang, bukan kepastian cuaca pada setiap lokasi. Agar bermanfaat, prakiraan harus dihubungkan dengan tindakan yang disepakati sebelumnya. Contohnya, penurunan hujan yang diperkirakan dapat memicu inspeksi kanal dan sumur, pengisian cadangan peralatan, patroli lebih sering, komunikasi dengan pemilik lahan, atau penjadwalan latihan pemadaman. Ambang tindakan perlu memperhitungkan ketidakpastian sekaligus biaya dari keterlambatan.

Pendekatan antisipatif dapat menggunakan pemicu bertingkat. Tahap awal meningkatkan pemantauan dan kesiapan logistik; tahap berikutnya memperluas patroli, memeriksa sumber air, serta memastikan fasilitas kesehatan memiliki rencana; apabila kekeringan memburuk dan indikator

bahan bakar meningkat, operasi lapangan dapat diperkuat. Tingkatan ini membantu menghindari pilihan biner antara keadaan normal dan darurat. Keputusan tetap memerlukan verifikasi observasi lokal dan pertimbangan keselamatan.

Pendanaan berbasis prakiraan hanya efektif jika tersedia prosedur pencairan cepat, kewenangan yang jelas, dan mekanisme pelaporan setelah tindakan. Evaluasi dapat membandingkan daerah yang mengaktifkan langkah antisipatif dengan daerah serupa yang belum melakukannya, sambil mempertimbangkan perbedaan iklim dan kapasitas. Tujuannya bukan mengklaim prakiraan selalu benar, tetapi mengetahui tindakan mana yang mengurangi risiko ketika kondisi yang diprediksi benar-benar muncul.

Glossarium

ENSO — El Niño–Southern Oscillation; interaksi laut–atmosfer di Pasifik tropis dengan fase hangat, netral, dan dingin.

El Niño — Fase hangat ENSO yang dapat menggeser pola konveksi dan mengurangi peluang hujan di sebagian Indonesia.

IOD — Indian Ocean Dipole; variasi gradien suhu muka laut Samudra Hindia yang memengaruhi curah hujan di kawasan sekitar.

Karhutla — Kebakaran hutan dan lahan, termasuk kebakaran pada ekosistem gambut.

Hotspot — Anomali termal yang dideteksi satelit; petunjuk kemungkinan aktivitas api, bukan ukuran langsung luas terbakar.

Luas terbakar — Area yang mengalami kebakaran, diestimasi dari data satelit atau pengukuran lapangan.

Muka air gambut — Kedalaman air tanah di lahan gambut; indikator kondisi hidrologi dan risiko pengeringan.

KBDI — Keetch–Byram Drought Index; indeks kekeringan yang digunakan untuk menilai kondisi bahan bakar dan risiko api.

Kekeringan meteorologis — Defisit curah hujan dibandingkan kondisi normal selama periode tertentu.

Sekat kanal — Struktur untuk menghambat aliran kanal dan membantu menaikkan atau mempertahankan muka air gambut.

Pembasahan kembali — Pemulihan kondisi hidrologis lahan gambut melalui pengelolaan air dan pengurangan drainase.

Emisi kebakaran — Gas dan partikel yang dilepaskan ke atmosfer akibat pembakaran biomassa dan bahan organik tanah.

Peringatan dini — Informasi risiko yang disertai tindakan operasional untuk mengurangi dampak sebelum kejadian membesar.

Restorasi ekologis — Proses membantu pemulihan struktur, fungsi, dan dinamika ekosistem yang terdegradasi.

Daftar Pustaka

Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2026, September 22). BMKG: El Niño sangat kuat sedang terjadi, musim hujan 2026/2027 diprediksi datang lebih lambat. https://www.bmkg.go.id/berita/utama/bmkg-el-nino-sangat-kuat-sedang-terjadi-musim-hujan-2026-2027-diprediksi-datang-lebih-lambat

Edwards, R. B., Naylor, R. L., Higgins, M. M., & Falcon, W. P. (2020). Causes of Indonesia's forest fires. World Development, 127, Article 104717. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104717

Fanin, T., & van der Werf, G. R. (2017). Precipitation–fire linkages in Indonesia (1997–2015). Biogeosciences, 14, 3995–4008. https://doi.org/10.5194/bg-14-3995-2017

Field, R. D., van der Werf, G. R., Fanin, T., Fetzer, E. J., Fuller, R., Jethva, H., Levy, R., Livesey, N. J., Luo, M., Torres, O., & Worden, H. M. (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

Hayasaka, H., Usup, A., & Naito, D. (2020). New approach evaluating peatland fires in Indonesian factors. Remote Sensing, 12(12), Article 2055. https://doi.org/10.3390/rs12122055

Kementerian Kehutanan Republik Indonesia. (2026, August 27). Hadapi El Niño, Kemenhut siaga sejak Maret. https://www.kehutanan.go.id/news/hadapi-el-nino-kemenhut-siaga-sejak-maret

Lam, T., Catto, J. L., Barciela, R., Harper, A. B., Challenor, P., & Arribas, A. (2024). Quantifying causal teleconnections to drought and fire risks in Indonesian Borneo. International Journal of Climatology, 44(6), 2087–2105. https://doi.org/10.1002/joc.8442

Lam, T., Catto, J. L., Kay, G., Dunstone, N., Barciela, R., & Harper, A. B. (2026). Major fires in Indonesian Borneo are possible under all ENSO phases. npj Natural Hazards, 3, Article 46. https://doi.org/10.1038/s44304-026-00209-4

National Oceanic and Atmospheric Administration. (n.d.). Understanding El Niño & ENSO. Retrieved October 21, 2026, from https://www.noaa.gov/understanding-el-nino

Novitasari, N., Sujono, J., Harto, S., Maas, A., & Jayadi, R. (2019). Drought index for peatland wildfire management in Central Kalimantan, Indonesia during El Niño phenomenon. Journal of Disaster Research, 14(7), 939–948. https://doi.org/10.20965/jdr.2019.p0939

Nurdiati, S., Bukhari, F., Julianto, M. T., Sopaheluwakan, A., Aprilia, M., Fajar, I., Septiawan, P., & Najib, M. K. (2022). The impact of El Niño Southern Oscillation and Indian Ocean Dipole on the burned area in Indonesia. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 33, Article 16. https://doi.org/10.1007/s44195-022-00016-0

Page, S. E., Rieley, J. O., & Banks, C. J. (2011). Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. Global Change Biology, 17(2), 798–818. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02279.x

Page, S. E., Siegert, F., Rieley, J. O., Boehm, H.-D. V., Jaya, A., & Limin, S. (2002). The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. Nature, 420(6911), 61–65. https://doi.org/10.1038/nature01131

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(14), 7974–7988. https://doi.org/10.1029/2018JD028402

Sulaiman, A., Osaki, M., Takahashi, H., Yamanaka, M. D., Susanto, R. D., Shimada, S., Kimura, K., Hirano, T., Wetadewi, R. I., Sisva, S., Kato, T., Kozan, O., Kubo, H., Awaluddin, A., & Tsuji, N. (2023). Peatland groundwater level in the Indonesian maritime continent as an alert for El Niño and moderate positive Indian Ocean dipole events. Scientific Reports, 13, Article 939. https://doi.org/10.1038/s41598-023-27393-x

Stockwell, C. E., Jayarathne, T., Cochrane, M. A., Ryan, K. C., Putra, E. I., Saharjo, B. H., Nurhayati, A. D., Albar, I., Blake, D. R., Simpson, I. J., Stone, E. A., & Yokelson, R. J. (2016). Field measurements of trace gases and aerosols emitted by peat fires in Central Kalimantan, Indonesia, during the 2015 El Niño. Atmospheric Chemistry and Physics, 16, 11711–11732. https://doi.org/10.5194/acp-16-11711-2016

Tacconi, L. (2003). Fires in Indonesia: Causes, costs and policy implications. Center for International Forestry Research. https://doi.org/10.17528/cifor/001200