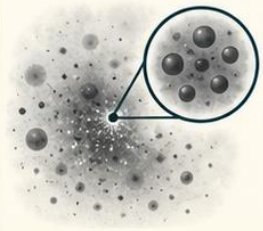
DAMPAK PARTIKEL HALUS PM2.5 TERHADAP KESEHATAN

Pada Masa Kebakaran Hutan



1 APA ITU PM2.5?



- Partikel berdiameter 2,5 mikrometer atau kurang
- Dapat terhirup hingga bagian dalam paru
- Asap juga mengandung gas dan polutan lain

2 BAGAIMANA PAPARAN TERJADI?



- Asap bergerak mengikuti angin
- Masuk ke rumah, sekolah, dan tempat kerja
- Dosis dipengaruhi konsentrasi, waktu, aktivitas, dan kondisi ruang

3 DAMPAK KESEHATAN



- Iritasi mata dan saluran napas
- Batuk, mengi, dan sesak
- Dapat memperburuk asma dan PPOK
- Risiko kardiovaskular dan dampak kehamilan terus diteliti

4 SIAPA YANG PERLU PERHATIAN KHUSUS?



Anak • Lansia • Ibu hamil

- Penderita asma, penyakit paru, atau jantung
- Pekerja luar ruang dan warga dengan akses perlindungan terbatas

5 LANGKAH PERLINDUNGAN



Pantau kualitas udara dan ikuti arahan resmi



Kurangi aktivitas berat di luar saat asap pekat



Gunakan ruang lebih bersih dengan filtrasi bila tersedia



Cari pertolongan medis bila gejala berat atau memburuk

Perlindungan paling kuat dimulai dengan mencegah kebakaran dan mengurangi paparan bersama.

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

Dampak Partikel Halus PM2.5 terhadap Kesehatan pada Masa Kebakaran Hutan

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

IBM-ASMI | RudyCT Academic Series
2026

Abstrak

Kebakaran hutan dan lahan melepaskan campuran polutan, dengan partikel halus PM2.5 sebagai salah satu komponen yang paling penting bagi kesehatan masyarakat karena dapat terhirup hingga bagian dalam paru dan tersebar jauh dari sumber api. Artikel ini menjelaskan bagaimana PM2.5 terbentuk dalam kebakaran vegetasi dan gambut, bagaimana konsentrasi udara berhubungan dengan paparan dan dosis terhirup, serta apa yang diketahui tentang dampak akut dan berkepanjangan pada sistem pernapasan, kardiovaskular, kehamilan, anak, lansia, dan kelompok lain. Kajian sistematis menunjukkan hubungan yang cukup konsisten antara asap kebakaran dan peningkatan dampak pernapasan, sementara bukti untuk sebagian luaran kardiovaskular dan perkembangan masih bervariasi menurut rancangan, wilayah, campuran polutan, dan cara mengestimasi paparan. Pengalaman Indonesia menambah dimensi penting: kebakaran gambut dapat berlangsung lama, data pemantauan permukaan masih terbatas di sejumlah wilayah, dan konsentrasi dalam ruang dapat berbeda dari pengukuran luar ruang. Naskah membedakan temuan epidemiologis, mekanisme biologis yang masih diteliti, dan rekomendasi kehati-hatian. Agenda perlindungan yang diajukan menggabungkan pencegahan kebakaran di sumber, pemantauan dan komunikasi kualitas udara,

pengurangan paparan personal dan komunitas, kesiapan layanan kesehatan, perlindungan pekerja, serta penelitian lokal yang transparan. Tujuan utamanya ialah mengubah pengetahuan tentang PM2.5 menjadi keputusan kesehatan dan tata kelola yang dapat dijalankan sebelum, selama, dan setelah episode kebakaran.

Kata Kunci
PM2.5; asap kebakaran; kebakaran hutan dan lahan; kesehatan masyarakat; penyakit pernapasan; penyakit kardiovaskular; paparan; Indonesia; gambut; kualitas udara.

1. Pendahuluan: PM2.5 sebagai jalur utama risiko kesehatan akibat asap

Pada masa kebakaran hutan dan lahan, asap dapat mengubah kualitas udara pada wilayah yang jauh dari nyala api. Di antara campuran yang terbentuk, partikel dengan diameter aerodinamis 2,5 mikrometer atau kurang—PM2.5—menjadi perhatian utama kesehatan masyarakat. Ukurannya yang kecil membuat partikel dapat masuk melewati saluran napas atas dan mencapai bagian dalam paru. Sebagian partikulat dapat berinteraksi dengan permukaan alveoli, sedangkan komponen larut dan respons biologis yang menyusul dapat berpengaruh lebih luas. Perhatian terhadap PM2.5 tidak berarti bahwa gas dan polutan lain dalam asap dapat diabaikan; ia merupakan salah satu ukuran paparan yang berguna dan sering tersedia untuk analisis kesehatan.

Risiko kesehatan tidak semata-mata ditentukan oleh angka konsentrasi. Lama paparan, puncak konsentrasi, aktivitas fisik, laju napas, infiltrasi asap ke rumah, komposisi kimia aerosol, usia, kondisi kesehatan, dan akses perlindungan turut menentukan dosis yang diterima. Dua warga pada kabupaten yang sama dapat mengalami paparan berbeda karena pekerjaan, jenis rumah, lokasi sekolah, penggunaan pendingin, dan waktu yang dihabiskan di luar ruang. Begitu pula, angka harian dari satu stasiun tidak

selalu menggambarkan semua lingkungan tempat warga tinggal dan beraktivitas.

Bukti ilmiah selama beberapa dekade menunjukkan bahwa polusi partikel berkaitan dengan gangguan kesehatan akut dan kronis. Namun, PM2.5 dari kebakaran tidak selalu identik dengan PM2.5 dari lalu lintas, industri, pembangkit, atau pembakaran rumah tangga. Sumber pembakaran menentukan ukuran partikel, kandungan karbon, senyawa organik, logam, dan gas pendamping. Campuran tersebut juga berubah seiring bahan bakar dan fase pembakaran. Karena itu, kajian khusus asap kebakaran penting untuk menguji apakah hubungan yang ditemukan pada polusi ambien umum dapat diterapkan dengan tepat pada episode kebakaran.

Artikel ini menyintesis karakteristik PM2.5 dari kebakaran, cara asap bergerak dan masuk ke lingkungan hunian, mekanisme biologis yang diteliti, serta bukti epidemiologis mengenai gangguan pernapasan, kardiovaskular, kehamilan, perkembangan anak, dan kesehatan kelompok berisiko. Pembahasan juga menguraikan pemantauan udara, respons kesehatan, dan kebijakan yang dapat mengurangi paparan. Bukti dari luar Indonesia dipakai sebagai dasar perbandingan, bukan sebagai pengganti pengukuran lokal; keadaan gambut tropis, karakter rumah, penggunaan ruang, iklim panas, dan pola akses layanan perlu diperhitungkan.

Pendirian utama naskah ini ialah bahwa perlindungan kesehatan harus bekerja sepanjang rantai risiko. Pengendalian api dan pemulihan hidrologi mengurangi emisi di hulu; jaringan pemantauan dan peringatan memberi informasi tentang udara; rumah dan fasilitas publik yang lebih bersih mengurangi paparan; layanan kesehatan membantu mencegah komplikasi; dan riset lokal memperbaiki keputusan. Pengurangan paparan layak dilakukan secara proporsional meskipun ketidakpastian masih ada, tetapi pesan perlindungan harus mempertimbangkan panas, akses air, kondisi tempat tinggal, pekerjaan, dan kebutuhan klinis agar satu bahaya tidak diganti dengan bahaya lain.

2. Kerangka konseptual: Sumber, paparan, dosis, respons, dan perlindungan

Risiko bencana dapat dipahami sebagai hasil interaksi bahaya, paparan, dan kerentanan. Bahaya dalam konteks karhutla meliputi kemungkinan api menyala, meluas, bertahan, dan menghasilkan asap. Paparan merujuk pada manusia, sekolah, fasilitas kesehatan, infrastruktur, hutan, satwa, kebun, dan aset ekonomi yang berada pada jalur api atau plume asap. Kerentanan menunjukkan seberapa mudah unsur yang terpapar mengalami kerugian dan seberapa terbatas kemampuannya untuk menghindari, menyerap, atau pulih dari dampak. Konsep ini menggeser perhatian dari pertanyaan "berapa titik api?" ke pertanyaan "siapa yang berisiko, di mana, mengapa, dan dengan kapasitas perlindungan apa?"

Bahaya api sendiri memiliki beberapa dimensi: peluang penyalaan, tingkat kekeringan bahan bakar, kecepatan rambat, intensitas panas, kedalaman pembakaran, durasi, serta emisi. Kebakaran yang luas tidak selalu menghasilkan paparan asap tertinggi di satu kota, karena angin, stabilitas atmosfer, hujan, topografi, dan jenis bahan bakar mengubah distribusi polutan. Sebaliknya, kebakaran yang relatif kecil pada gambut yang kering dekat permukiman dapat menimbulkan pencemaran lokal yang berat. Pemetaan risiko karenanya perlu menyatukan data hotspot, kelembapan tanah, kedalaman gambut, kanal, tutupan lahan, permukiman, arah angin, kualitas udara, serta data sosial dan kesehatan.

Kerentanan tidak merata. Anak-anak menghirup lebih banyak udara per satuan berat badan dan paru-parunya masih berkembang. Lansia, ibu hamil, penderita asma, penyakit paru obstruktif kronis, penyakit jantung, dan pekerja luar ruang dapat menghadapi risiko lebih besar. Keluarga berpendapatan rendah mungkin tidak memiliki ruang tertutup, filter udara, pilihan untuk tinggal sementara di tempat lain, atau pekerjaan yang memungkinkan mereka berhenti bekerja ketika kualitas udara memburuk. Sekolah dan puskesmas di daerah terpencil dapat kekurangan alat pengukur dan pasokan medis.

Kebijakan yang menyampaikan pesan “tetap di dalam ruangan” tanpa menyediakan ruang aman atau perlindungan penghasilan dapat memindahkan beban kepada warga yang paling rentan.

Pendekatan sosio-ekologis memandang lanskap sebagai sistem yang saling terhubung. Perubahan pada satu bagian, misalnya kanal untuk mengeringkan gambut, dapat memengaruhi muka air, kelembapan vegetasi, emisi, peluang api, kualitas air, dan mata pencaharian. Hasilnya tidak selalu linear: kekeringan beberapa minggu mungkin tidak berbahaya pada gambut yang masih basah, tetapi dapat menjadi sangat berbahaya jika muka air telah turun dan bahan bakar menumpuk. Risiko adalah hasil lintasan sejarah penggunaan lahan, bukan hanya keadaan cuaca hari ini. Ini membantu menjelaskan mengapa upaya mitigasi perlu dilakukan sebelum musim kemarau, sebelum kanal dan vegetasi berada pada kondisi kritis.

Dari sudut pandang manajemen risiko, siklus kebakaran mencakup pencegahan, kesiapsiagaan, respons, pemulihan, dan pembelajaran. Pencegahan mengurangi kemungkinan terjadinya api dan kondisi yang membuat api tak terkendali. Kesiapsiagaan memastikan peringatan, sumber air, personel, alat, dan layanan kesehatan siap. Respons membatasi api dan paparan dengan mengutamakan keselamatan manusia. Pemulihan memperbaiki ekosistem, penghidupan, layanan publik, serta kesehatan masyarakat. Pembelajaran menguji apakah intervensi berhasil dan mengubah kebijakan ketika hasilnya tidak memadai. Jika anggaran dan perhatian hanya mengalir pada tahap respons, sistem akan terus membayar mahal untuk mengatasi akibat yang berulang.

3. Kebakaran hutan dan lahan sebagai sumber PM2.5

Indonesia memiliki ekosistem yang beragam, dari hutan hujan dataran rendah hingga hutan pegunungan, savana, mangrove, lahan pertanian, perkebunan, dan rawa gambut. Api memiliki peran ekologis pada beberapa ekosistem yang secara alami mengalami kebakaran berkala, tetapi kebakaran besar dan

berulang pada hutan hujan lembap atau gambut yang dikeringkan bukanlah proses yang setara dengan rezim api alami. Perubahan tutupan lahan dapat membuat hutan lebih terbuka, meningkatkan paparan sinar dan angin, mengeringkan serasah, serta menciptakan akses bagi kegiatan manusia. Fragmentasi juga menambah tepi hutan yang rentan dan memudahkan api berpindah ke vegetasi yang sebelumnya terlindungi.

Gambut terbentuk dari akumulasi bahan organik yang membusuk secara tidak sempurna dalam lingkungan jenuh air. Air adalah unsur pengaman utama: ketika muka air tetap tinggi, lapisan gambut lebih sulit terbakar. Drainase untuk perkebunan, pertanian, atau infrastruktur menurunkan muka air, meningkatkan oksidasi dan subsidensi, mengubah mikroklimat, dan mengeringkan bahan organik. Kanal yang dibuat untuk mengeluarkan air juga dapat menjadi jalur masuknya api dan mempercepat kekeringan di sekitarnya. Jika api masuk ke lapisan gambut, pembakaran dapat berlangsung secara membara di bawah permukaan dan menghabiskan bahan bakar organik dalam waktu lama.

Kebakaran gambut memiliki implikasi iklim yang besar karena karbon tersimpan bukan hanya dalam biomassa pohon, tetapi juga dalam tanah organik. Pembakaran melepaskan karbon dioksida dan polutan lain; emisi per hektare dapat sangat tinggi bila api mengonsumsi lapisan gambut yang tebal. Dengan demikian, luas terbakar saja tidak cukup untuk menggambarkan kerusakan. Dua kejadian dengan luas sama dapat berbeda jauh dalam kedalaman pembakaran, massa bahan organik yang hilang, emisi, dan peluang pemulihan. Pemantauan perlu menggabungkan luas, jenis ekosistem, kedalaman, tingkat keparahan, durasi, dan perubahan muka air.

Pembasahan kembali atau rewetting melalui sekat kanal, pengelolaan pintu air, sumur bor untuk keadaan tertentu, dan pemulihan hidrologi bertujuan menjaga kelembapan gambut. Intervensi fisik harus dirancang secara hidrologis, bukan sekadar membangun struktur di satu titik. Air bergerak mengikuti kesatuan hidrologis gambut; sekat yang tidak tepat dapat menimbulkan genangan pada satu area, mengurangi air di area lain, atau rusak

ketika debit tinggi. Pemantauan muka air dan pemeliharaan berkala sama pentingnya dengan konstruksi. Pendekatan hidrologis harus dikaitkan dengan kebutuhan warga yang menggunakan air untuk pertanian, transportasi, dan kehidupan sehari-hari.

Restorasi gambut bukan pekerjaan menanam pohon setelah api padam saja. Ia meliputi pemulihan tata air, perlindungan vegetasi tersisa, regenerasi spesies asli, pengendalian akses yang meningkatkan risiko, pengelolaan spesies invasif, serta dukungan kepada penghidupan yang tidak bergantung pada pengeringan. Pada sejumlah lokasi, pemanfaatan ekonomi yang kompatibel dengan kondisi basah dapat membantu menjaga fungsi ekosistem. Namun, pilihan komoditas perlu diuji menurut kondisi biofisik, hak masyarakat, pasar, beban kerja, dan risiko ketergantungan baru. Solusi yang berhasil di satu desa tidak otomatis cocok di desa lain.

4. Asal, sifat, dan komposisi PM2.5 dalam asap kebakaran

PM2.5 adalah fraksi partikulat yang memiliki diameter aerodinamis 2,5 mikrometer atau lebih kecil. Istilah ini merujuk pada ukuran aerodinamis, bukan bentuk geometris yang seragam. Fraksi tersebut dapat mencakup partikel primer yang langsung dilepas saat pembakaran serta partikel sekunder yang terbentuk di atmosfer melalui reaksi kimia gas-gas prekursor. Dalam asap kebakaran, komposisinya dipengaruhi spesies tumbuhan, kelembapan dan jenis bahan bakar, suhu pembakaran, kadar oksigen, proporsi pembakaran menyala dan membara, serta interaksi dengan polutan lain di udara.

Pembakaran vegetasi menghasilkan jelaga atau karbon hitam, karbon organik, abu mineral, senyawa organik yang mengembun, dan berbagai gas. Kebakaran gambut menambahkan karakter pembakaran bahan organik bawah permukaan; pembakaran dapat berlangsung lama dan tidak selalu terlihat sebagai nyala tinggi. Pengukuran lapangan pada kebakaran gambut di Kalimantan Tengah mendokumentasikan emisi aerosol dan gas yang

kompleks (Stockwell et al., 2016). Komposisi asap bukan hanya fungsi dari "banyaknya api"; dua kejadian dengan massa PM2.5 yang sebanding dapat memiliki campuran kimia berbeda.

Partikel primer dapat mengalami penuaan atmosferik: reaksi oksidasi dan kondensasi mengubah ukuran, kelarutan, dan sifat permukaannya selama transportasi. Interaksi dengan kelembapan, sinar matahari, dan polutan perkotaan membentuk campuran yang dihirup penduduk di wilayah hilir. Oleh sebab itu, karakteristik aerosol dekat api tidak selalu sama dengan karakteristik di kota yang menerima plume berjam-jam atau berhari-hari kemudian. Model dispersi dan pengukuran kimia diperlukan untuk menerangkan perubahan itu, tetapi jaringan pengamatan yang terbatas membuat beberapa aspek masih belum terukur di Indonesia.

Fraksi halus lebih mudah bertahan di udara dibandingkan partikel yang lebih besar dan dapat terhirup jauh ke saluran pernapasan bawah. Ukuran saja tidak menerangkan seluruh toksisitas. Komposisi kimia, bentuk, kelarutan, kemampuan menghasilkan spesies oksidatif, dan dosis berpengaruh terhadap respons biologis. Karenanya, PM2.5 adalah indikator penting tetapi bukan deskripsi lengkap dari bahaya asap. Pengukuran massa PM2.5 perlu dilengkapi informasi sumber, komposisi, gas, dan kondisi meteorologis bila tujuan penelitian ialah membedakan dampak campuran kebakaran dari sumber lainnya.

Konsentrasi PM2.5 ambien menyatakan massa partikel dalam volume udara, lazimnya mikrogram per meter kubik. Konsentrasi bukan dosis personal: dosis bergantung pada konsentrasi selama seluruh waktu dan tempat aktivitas, laju ventilasi paru, serta penetrasi partikel ke alat pernapasan atau lingkungan dalam ruang. Perbedaan ini penting bagi pekerja di luar, anak yang beraktivitas, orang yang tinggal dekat titik kebakaran, dan penduduk kota yang menerima asap kiriman. Nilai dari alat sensor juga dipengaruhi kalibrasi, kelembapan, dan metode koreksi; interpretasinya harus menyebut jenis instrumen dan ketidakpastian.

WHO merekomendasikan panduan berbasis kesehatan untuk PM2.5, termasuk rata-rata tahunan dan 24 jam (WHO, 2021). Pedoman tersebut mendukung pengelolaan kualitas udara dan penilaian risiko populasi. Nilainya tidak boleh diperlakukan sebagai batas yang memastikan tidak ada risiko bagi setiap individu, sebagai ambang klinis untuk mendiagnosis penyakit, atau sebagai satu-satunya pemicu respons operasional saat kebakaran. Dalam konteks kebakaran, keputusan juga mempertimbangkan durasi, pola konsentrasi, prakiraan, kelompok yang terpapar, dan kapasitas perlindungan lokal.

PM2.5 bukan satu-satunya komponen yang patut diperhatikan. Karbon monoksida berbahaya terutama pada paparan dekat sumber pembakaran dan ruang tertutup; ozon sekunder dan iritan lain juga dapat terbentuk. Respirator partikulat dapat menyaring partikel tertentu bila pas dan digunakan tepat, tetapi tidak menyaring semua gas. Karena itu, pesan publik perlu membedakan bahaya kebakaran langsung, paparan asap ambien, dan risiko campuran polutan, serta memberi jalur pertolongan jika gejala berat muncul.

5. Mekanisme biologis dampak PM2.5 terhadap tubuh

Ketika PM2.5 terhirup, sebagian partikel tertahan di berbagai bagian saluran napas bergantung pada ukurannya dan cara bernapas. Interaksi dengan jaringan dapat memicu iritasi, aktivasi sel imun, mediator inflamasi, dan stres oksidatif. Respons dapat berbeda di antara individu dan bergantung pada dosis, durasi, kesehatan dasar, usia, serta komposisi partikel. Mekanisme ini memberi plausibilitas biologis untuk hubungan antara asap dan gangguan pernapasan maupun perubahan sistemik, tetapi temuan mekanistik tidak dengan sendirinya membuktikan besarnya risiko klinis pada populasi tertentu.

Pada sistem pernapasan, respons inflamasi dan iritasi dapat meningkatkan produksi lendir, sensitivitas bronkus, dan hambatan aliran udara. Hal itu

dapat memicu batuk, mengi, sesak, atau eksaserbasi asma dan PPOK pada orang yang rentan. PM2.5 dapat mencapai wilayah paru yang lebih dalam dibandingkan partikel kasar; makrofag dan mekanisme pertahanan lokal berupaya membersihkan partikel, tetapi paparan berulang dapat membebani pertahanan tersebut. Infeksi, panas, dan polusi lain dapat hadir bersamaan, sehingga gejala selama episode asap tidak boleh dianggap memiliki satu penyebab tanpa pemeriksaan klinis.

Dampak kardiovaskular dipelajari melalui beberapa jalur: peradangan sistemik, perubahan fungsi endotel pembuluh, stres oksidatif, aktivitas sistem saraf otonom, dan potensi perubahan koagulasi. Perubahan fisiologis itu dapat memberi tekanan tambahan pada orang dengan penyakit jantung atau faktor risiko seperti hipertensi dan diabetes. Studi tentang asap kebakaran melaporkan hubungan dengan mortalitas dan rawat inap pernapasan lebih konsisten daripada beberapa luaran kardiovaskular; meta-analisis dan tinjauan Gould et al. (2024) menekankan variasi dan keterbatasan bukti untuk sebagian hasil jantung. Perbedaan temuan bukan alasan untuk mengabaikan risiko, melainkan alasan untuk memperbaiki studi dan komunikasi.

Sejumlah penelitian menelaah kemungkinan efek pada sistem saraf dan fungsi kognitif melalui inflamasi, stres oksidatif, atau gangguan vaskular. Hipotesis tersebut memerlukan pengujian lebih lanjut, terutama untuk membedakan efek paparan akut dari paparan kumulatif, penyakit yang sudah ada, stres akibat kebakaran, dan faktor sosial. Literatur tentang kesehatan mental juga mengingatkan bahwa kecemasan, kehilangan mata pencaharian, evakuasi, dan ketidakpastian dapat memengaruhi kesehatan, tetapi unsur-unsur itu tidak boleh disamakan dengan efek biologis langsung PM2.5.

Kehamilan merupakan periode dengan perubahan fisiologis yang penting. Penelitian menguji kemungkinan bahwa polusi partikel memengaruhi inflamasi maternal, fungsi plasenta, pertukaran oksigen, dan pertumbuhan janin. Sebagian jalur tersebut masih berupa hipotesis atau hasil studi observasional yang belum seragam. Ulasan sistematis dan meta-analisis

tentang asap kebakaran selama kehamilan melaporkan sinyal potensi hubungan dengan luaran perinatal tertentu, tetapi variasi definisi paparan dan hasil membatasi kepastian (Foo et al., 2024). Pembahasan ilmiah harus menghindari klaim deterministik tentang hasil pada satu kehamilan.

Pada bayi dan anak, paru dan sistem imun berkembang, sementara kebutuhan ventilasi per kilogram berat badan relatif tinggi. Anak kecil juga bergantung pada orang dewasa dalam menentukan kapan keluar rumah, mengakses obat, atau memperoleh perlindungan. Bukti pada anak mencakup peningkatan gejala dan kunjungan layanan pernapasan selama episode asap, namun efek pada pertumbuhan paru dan perkembangan jangka panjang membutuhkan data longitudinal dan pengukuran paparan yang lebih baik. Sekolah, layanan pengasuhan, dan keluarga merupakan bagian penting dari pencegahan paparan.

Bagi lansia dan orang dengan penyakit kronis, respons terhadap paparan dapat diperberat oleh cadangan fisiologis yang lebih rendah, komorbiditas, obat rutin, atau keterbatasan mobilitas. Kualitas rumah, dukungan keluarga, akses informasi, dan kemampuan mencapai klinik memengaruhi apakah gangguan ringan berkembang menjadi komplikasi. Kerentanan dengan demikian merupakan interaksi biologis dan sosial; tindakan kesehatan masyarakat perlu mengatasi paparan dan hambatan perlindungan bersama-sama.

Bukti mekanistik membantu menerangkan kemungkinan hubungan, tetapi tidak dapat menggantikan epidemiologi manusia. Model laboratorium menggunakan dosis, jenis sel, atau durasi yang mungkin tidak sama dengan paparan ambien. Bukti epidemiologi juga menghadapi persoalan paparan campuran, kesalahan pengukuran, dan faktor perancu. Penilaian yang kuat menggabungkan kimia aerosol, toksikologi, studi klinis, surveilans, dan rancangan populasi yang mampu mengisolasi variasi paparan secara masuk akal.

6. Penyebab dan pendorong kebakaran

Sumber penyalaan utama di banyak lanskap Indonesia berkaitan dengan aktivitas manusia. Api dapat dipakai untuk membersihkan lahan, mengelola sisa tanaman, membuka akses, memperbarui padang, mengusir satwa, atau menandai klaim. Sebagian api yang dinyalakan untuk pengelolaan terbatas dapat lepas ketika angin kencang, bahan bakar kering, atau pengawasan kurang. Pada lahan gambut, praktik yang dianggap terkendali di tanah mineral dapat menjadi sangat berbahaya karena api masuk ke bawah permukaan dan sulit dideteksi. Namun, tidak tepat menyederhanakan seluruh kebakaran sebagai tindakan yang sama: motif, skala, kapasitas, dan manfaat ekonomi berbeda antara petani kecil, pemegang konsesi, kontraktor, dan pihak yang terlibat dalam konflik lahan.

Tacconi et al. (2020) menunjukkan bahwa penyebab kebakaran di Indonesia bersifat berlapis. Analisis pada tingkat desa dan kabupaten menemukan hubungan antara penggunaan api dalam pertanian, keterpencilan, tingkat pembangunan, kondisi iklim, dan faktor spasial lain. Temuan tersebut mengingatkan bahwa korelasi tidak dapat digunakan untuk menuduh satu kelompok tertentu. Data hotspot memberi lokasi indikatif, bukan identitas pelaku maupun bukti bahwa sebuah perusahaan atau petani melakukan pembakaran. Penetapan tanggung jawab memerlukan investigasi lapangan, bukti penguasaan lahan, pola api, citra satelit, keterangan saksi, dokumen izin, dan prosedur hukum yang transparan.

Faktor ekonomi memperkuat penggunaan api. Pembakaran sering lebih murah dan lebih cepat dibandingkan pembukaan mekanis; biaya sosial dan kesehatan tidak masuk ke dalam perhitungan pelaku. Jika keuntungan privat diperoleh segera sementara kerugian ditanggung publik, api menjadi pilihan yang secara sempit dianggap rasional. Perubahan harga komoditas dapat mendorong ekspansi atau intensifikasi pembukaan lahan. Ketidakjelasan batas, sengketa tenurial, akses yang tidak setara terhadap alat, dan lemahnya pengawasan dapat menambah insentif untuk membakar. Sebaliknya, larangan membakar

tanpa dukungan teknologi, pembiayaan, dan jalur legal yang jelas dapat mendorong praktik menjadi lebih tersembunyi atau memperberat petani kecil.

Perusahaan dan rantai pasok memegang peranan penting pada lanskap konsesi. Risiko dapat muncul dari pembukaan lahan, pengelolaan drainase, jalan dan kanal, pemeliharaan sekat kanal, pengawasan kontraktor, serta tanggap darurat. Audit kebakaran harus menilai praktik perusahaan di seluruh konsesi dan lanskap sekitarnya, tidak hanya saat api terlihat. Pembeli, lembaga keuangan, dan pemilik merek dapat mendorong standar tanpa bakar, keterlacakan pemasok, verifikasi independen, dan pemulihan. Tindakan akuntabilitas perlu ditentukan oleh bukti dan prinsip tanggung jawab yang berlaku, seraya menghindari generalisasi bahwa semua kebakaran berasal dari perusahaan atau semua masyarakat lokal tidak bertanggung jawab.

Kondisi politik dan administrasi membentuk kemampuan pencegahan. Kewenangan penggunaan lahan, kehutanan, perkebunan, lingkungan, kebencanaan, dan tata ruang tersebar di berbagai lembaga. Tumpang tindih perizinan dan lemahnya pertukaran data dapat menciptakan ruang abu-abu. Perubahan pemimpin daerah, prioritas pembangunan, kapasitas anggaran, dan hubungan antara aktor lokal dengan pusat dapat memengaruhi kecepatan respons. Literatur tentang tata kelola kebakaran menyoroti bahwa kebijakan dapat mandek ketika tanggung jawab tersebar, sementara kerugian tidak memiliki pemilik administratif yang jelas. Karena itu, koordinasi harus memiliki mandat, protokol, indikator, dan jalur eskalasi yang konkret.

El Niño dan variabilitas iklim regional memengaruhi peluang serta tingkat keparahan kebakaran dengan mengubah curah hujan, lama kemarau, suhu, dan kelembapan bahan bakar. Iklim bukan sumber penyalaan itu sendiri; ia memperbesar peluang api menyebar dan membara. Keterkaitan antara kekeringan dan kebakaran bukan hubungan otomatis: lanskap dengan tata air terjaga, bahan bakar dikelola, dan praktik tanpa bakar dapat lebih tahan. Sebaliknya, beberapa pekan kering pada gambut terdrainase dapat meningkatkan risiko dengan cepat. Perubahan iklim jangka panjang dapat

menggeser pola kekeringan dan memperpanjang musim bahaya, meskipun setiap kejadian tertentu tetap perlu dianalisis berdasarkan bukti meteorologisnya.

7. Cuaca, prakiraan asap, dan peringatan kesehatan

Prediksi musiman memiliki nilai operasional ketika diterjemahkan menjadi keputusan. Prakiraan curah hujan dan suhu perlu dikombinasikan dengan pemantauan muka air tanah, kelembapan bahan bakar, indeks bahaya api, kondisi kanal, histori hotspot, serta kalender tanam. Informasi bahwa kemarau akan lebih kering tidak cukup bila tidak diikuti penentuan desa prioritas, jadwal patroli, lokasi sumur bor atau sumber air, penempatan alat, kesiapan fasilitas kesehatan, dan komunikasi risiko kepada warga. Sistem prakiraan yang baik mengurangi ketidakpastian, tetapi tidak menghapus kebutuhan untuk bertindak ketika sinyal risiko meningkat.

BMKG dan lembaga lain dapat menyampaikan informasi dalam skala yang sesuai kebutuhan. Pemerintah kabupaten memerlukan informasi mingguan untuk mengatur sumber daya; petugas lapangan memerlukan peta harian atau lebih cepat; warga membutuhkan pesan sederhana tentang tindakan yang dapat diambil. Indeks bahaya perlu dilengkapi penjelasan: risiko tinggi karena hujan rendah selama sekian hari, muka air turun, dan bahan bakar kering, misalnya. Data teknis harus dapat diakses dan dibaca oleh pemerintah lokal, organisasi masyarakat, serta peneliti. Namun, hotspot tidak selalu berarti kebakaran aktual, dan ketiadaan hotspot tidak selalu membuktikan lanskap bebas api. Tutupan awan, waktu lintasan satelit, ukuran api, temperatur, dan resolusi sensor memengaruhi deteksi.

Operasi modifikasi cuaca dapat membantu meningkatkan curah hujan atau mengurangi kondisi sangat kering pada wilayah prioritas ketika syarat meteorologis memungkinkan. Intervensi ini dapat menjadi salah satu alat, tetapi tidak menggantikan pembasahan gambut, pembatasan drainase, pengurangan sumber penyalaan, atau kesiapan kesehatan. Efektivitas dan

biaya operasi perlu dievaluasi secara transparan, termasuk wilayah yang mendapat manfaat dan risiko pergeseran hujan. Prinsip yang sama berlaku untuk water bombing: efektif dalam kondisi dan lokasi tertentu, tetapi tidak dapat menggantikan pemadaman bawah permukaan pada gambut yang luas, jauh dari sumber air, atau sulit diakses.

Risiko iklim perlu dipandang sebagai masalah adaptasi pembangunan. Infrastruktur air, jalan, kanal, sistem pertanian, dan permukiman seharusnya dirancang dengan memperhitungkan kondisi kering dan bahaya api. Perencanaan yang hanya menggunakan rata-rata historis dapat gagal ketika terjadi musim ekstrem. Skenario iklim membantu menguji apakah kapasitas pemadaman, fasilitas kesehatan, stok masker, jaringan komunikasi, dan tata kelola air cukup menghadapi kejadian yang lebih panjang. Pengujian skenario juga membantu pemerintah menetapkan ambang tindakan dini, misalnya kapan pembukaan lahan harus dihentikan, kapan sekolah harus mengubah kegiatan, dan kapan klinik perlu menambah layanan.

8. Dampak PM2.5 pada sistem tubuh dan kelompok berisiko

Dampak yang paling cepat teramati pada episode asap adalah iritasi mata dan saluran napas, batuk, hidung tersumbat, sakit tenggorokan, mengi, dan sesak. Keluhan ringan dapat mereda ketika udara membaik, tetapi sebagian orang memerlukan obat atau pelayanan medis. Tinjauan sistematis Liu et al. (2015), ulasan kritis Reid et al. (2016), serta telaah naratif lebih baru oleh Rizzo dan Rizzo (2025) menemukan bukti paling jelas untuk sejumlah luaran respirasi, termasuk gejala dan peningkatan pemanfaatan layanan kesehatan. Tinjauan yang lebih baru mengonfirmasi hubungan asap kebakaran dengan mortalitas semua sebab dan rawat inap pernapasan, sambil mencatat kurang konsistennya bukti kardiovaskular (Gould et al., 2024).

Asma dapat memburuk melalui peningkatan iritasi dan respons bronkial, sementara penderita PPOK mungkin mengalami sesak yang lebih berat atau kebutuhan perawatan tambahan. Anak, lansia, dan orang dengan gangguan

paru dapat menjadi lebih sensitif terhadap episode tertentu. Pelayanan kesehatan perlu memantau lonjakan gejala dan ketersediaan obat, namun penyebab gangguan pernapasan juga mencakup infeksi, debu, ozon, dan polusi domestik. Penilaian klinis individu tetap menjadi tanggung jawab tenaga kesehatan.

Pada sistem kardiovaskular, pertanyaan ilmiah mencakup apakah asap kebakaran meningkatkan kunjungan gawat darurat, aritmia, kejadian iskemik, stroke, atau kematian dalam jangka pendek. Hasil antarpublikasi tidak selalu sama. Perbedaan mungkin berhubungan dengan komposisi asap, tingkat paparan, kondisi populasi, definisi kejadian, jeda waktu yang dianalisis, dan ketepatan atribusi PM2.5 kebakaran. Karena orang dengan penyakit kardiovaskular dapat memiliki risiko dasar tinggi, pendekatan kehati-hatian dan kesinambungan pengobatan tetap penting walau besaran risiko tambahan belum dapat ditetapkan untuk semua konteks.

Bagi kehamilan, penelitian menelaah kelahiran prematur, berat lahir, pertumbuhan janin, dan luaran maternal. Tinjauan Foo et al. (2024) menggabungkan bukti dari beragam lokasi dan menemukan bahwa kesimpulan untuk sejumlah hasil tidak sepenuhnya konklusif akibat heterogenitas. Studi mengukur asap dengan cara yang berbeda dan memiliki cakupan geografis yang tidak merata. Karena itu, hasil populasi tidak dapat digunakan untuk meramalkan keadaan setiap ibu atau janin, dan ibu tidak patut disalahkan atas paparan yang ditentukan oleh kondisi lingkungan dan kebijakan.

Dampak bagi bayi dan anak dapat terlihat dalam gejala pernapasan, penggunaan obat, kunjungan klinik, dan gangguan aktivitas. Penutupan sekolah atau pengurangan aktivitas luar ruang mengubah rutinitas, pembelajaran, dan pengasuhan. Penelitian jangka panjang masih perlu memisahkan pengaruh asap dari kondisi prenatal lain, infeksi, status sosial-ekonomi, dan polusi non-kebakaran. Pusat penitipan anak dan sekolah dapat

mengurangi paparan dengan protokol yang mempertimbangkan ventilasi, filtrasi, suhu ruang, serta kebutuhan anak dengan kondisi khusus.

Lansia, penyandang penyakit jantung, diabetes, penyakit ginjal, dan penyandang disabilitas dapat menghadapi risiko yang bertumpuk dengan gangguan mobilitas, kebutuhan obat, dan ketergantungan pada pendamping. Tinjauan Cummings Melton et al. (2023) mencatat celah pengetahuan tentang pengalaman langsung lansia dan efektivitas intervensi yang dirancang khusus. Hal ini menegaskan pentingnya daftar kebutuhan yang dijaga privasinya, komunikasi yang dapat diakses, transportasi, serta layanan pemeriksaan kondisi selama episode berkepanjangan.

Dampak PM2.5 tidak hanya diukur dengan kematian atau rawat inap. Keluhan, penggunaan obat, hilangnya hari kerja, absensi sekolah, gangguan tidur, pengeluaran rumah tangga, dan tertundanya layanan rutin dapat membentuk beban yang luas. Beban tersebut tidak terbagi merata: pekerja informal mungkin tidak dapat berhenti bekerja; keluarga miskin mungkin tidak mampu menutup rumah atau membeli filtrasi; masyarakat dekat gambut dapat mengalami paparan lebih panjang. Penilaian dampak perlu memasukkan indikator kesehatan dan sosial yang relevan tanpa mengklaim bahwa semua kerugian disebabkan oleh PM2.5 saja.

Angka kematian atau penyakit yang diatribusikan kepada asap sering diperoleh melalui model epidemiologi dan bukan penghitungan setiap kasus secara individual. Estimasi bergantung pada fungsi paparan-respons, peta konsentrasi, data populasi, baseline kesehatan, serta asumsi tentang komposisi asap. Komunikasi harus memberi label “estimasi model”, menjelaskan cakupan dan ketidakpastian, dan menghindari perbandingan langsung bila metode berbeda. Kejujuran metodologis memperkuat kredibilitas pesan kesehatan masyarakat.

9. Dampak sosial, pendidikan, ekonomi, dan ekologis

Kabut asap mengganggu proses pendidikan ketika sekolah ditutup, aktivitas olahraga dihentikan, perjalanan siswa menjadi tidak aman, atau kualitas udara ruang kelas memburuk. Penutupan sekolah dapat melindungi kesehatan dalam jangka pendek, tetapi menimbulkan kehilangan jam belajar dan memperlebar kesenjangan bila pembelajaran jarak jauh tidak tersedia. Rumah tangga yang tidak memiliki jaringan internet, ruang belajar, atau perangkat akan menanggung kerugian yang lebih besar. Sekolah perlu memiliki protokol kualitas udara yang mempertimbangkan kesehatan, kesinambungan belajar, kebutuhan anak berkebutuhan khusus, serta kondisi keluarga pekerja harian.

Dampak ekonomi meliputi kerusakan tanaman dan hutan, hilangnya hari kerja, terganggunya transportasi, penutupan usaha, pembatalan penerbangan, biaya pemadaman, perawatan kesehatan, serta penurunan daya tarik wisata. Kerugian tidak hanya berasal dari nilai aset yang terbakar. Asap dapat memengaruhi sektor yang jauh dari titik api karena mengurangi visibilitas, menghambat logistik, dan meningkatkan biaya perlindungan. Penilaian biaya juga perlu memisahkan kerugian langsung, gangguan layanan, kerusakan modal alam, biaya kesehatan jangka panjang, dan biaya karbon. Kajian Kiely et al. (2021) yang memasukkan dampak kesehatan dan karbon menemukan biaya lebih tinggi daripada penilaian yang berfokus pada aset fisik saja.

Kebakaran mengubah ekosistem melalui hilangnya vegetasi, kematian satwa, fragmentasi habitat, perubahan struktur tanah, erosi, dan perubahan aliran air. Spesies dengan mobilitas terbatas dapat terperangkap atau kehilangan habitat. Satwa yang lolos dari api mungkin berpindah ke kebun dan permukiman, sehingga meningkatkan konflik manusia-satwa. Pada gambut, pembakaran dapat merusak lapisan organik dan menciptakan kondisi yang menyulitkan regenerasi spesies asli. Kebakaran berulang dapat menggeser ekosistem menuju vegetasi yang lebih mudah terbakar, membentuk lingkaran umpan balik: api merusak hutan, hutan yang rusak menjadi lebih kering, dan kebakaran berikutnya makin mudah terjadi.

Keadilan sosial menjadi aspek penting. Orang yang menikmati keuntungan dari pembukaan lahan belum tentu sama dengan orang yang menghirup asap. Komunitas adat dan lokal dapat kehilangan akses terhadap hutan, kebun, sumber pangan, dan tempat budaya. Petani kecil dapat menghadapi sanksi ketika kebakaran terjadi tanpa memperoleh dukungan teknis untuk praktik alternatif, sementara pelaku berkapasitas lebih besar mungkin lebih mampu menavigasi proses administrasi. Analisis yang adil mempertimbangkan siapa yang menimbulkan risiko, siapa yang menerima manfaat, siapa yang menanggung biaya, serta siapa yang memiliki suara dalam keputusan. Ini bukan alasan untuk mengabaikan hukum, melainkan dasar untuk menerapkan hukum secara konsisten dan proporsional.

Pada tingkat regional, asap dapat melintasi batas negara dan menimbulkan konsekuensi diplomatik. Asap lintas batas tidak mengubah tanggung jawab nasional atas pencegahan di wilayah masing-masing, tetapi menguatkan kepentingan kerja sama mengenai informasi, bantuan teknis, pemantauan, standar, dan kesiapsiagaan. Mekanisme ASEAN dapat mendukung pertukaran data, latihan bersama, dan bantuan pemadaman yang diminta negara terdampak. Kepercayaan regional memerlukan komunikasi tepat waktu dan data yang dapat dibandingkan, bukan hanya pernyataan setelah krisis mencapai puncak.

10. Episode kebakaran Indonesia dan paparan PM2.5

Episode kebakaran 1997–1998, 2015, dan 2019 memperlihatkan bagaimana kekeringan, kondisi gambut, penggunaan lahan, dan cuaca dapat bergabung menghasilkan asap regional. Tahun 2015 menjadi salah satu episode paling intens dalam catatan modern Asia Tenggara. Analisis pemodelan dan data paparan menunjukkan bahwa asap menimbulkan dampak kualitas udara yang luas, termasuk pada populasi yang tinggal jauh dari titik kebakaran (Koplitz et al., 2016; Kiely et al., 2020). Studi tersebut membantu mengalihkan

perhatian dari luas kebakaran semata ke jumlah penduduk yang terpapar serta lama konsentrasi tinggi.

Estimasi kesehatan untuk kebakaran besar menggabungkan emisi, transportasi atmosfer, konsentrasi, populasi, dan hubungan paparan-respons. Hasilnya dapat mencakup perkiraan penyakit, kematian dini, atau hari dengan udara tidak sehat. Angka tersebut berguna untuk memahami skala masalah, tetapi tidak selalu identik dengan catatan kasus klinis dan tidak tepat dibaca sebagai daftar individu yang sakit akibat satu sumber. Variasi data dan metode membuat estimasi studi berbeda; peneliti dan pembuat kebijakan perlu membaca asumsi dan rentang ketidakpastian sebelum membandingkan hasil.

Studi dampak kebakaran gambut di Kalimantan Tengah menggunakan pendekatan penilaian dampak kesehatan untuk menghubungkan paparan dengan beberapa hasil kesehatan (Uda et al., 2019). Karya Hein et al. (2022) memperluas analisis biaya kesehatan kebakaran gambut Indonesia melalui fungsi respons dan data populasi. Kesimpulan pentingnya bukan satu angka universal untuk seluruh Indonesia, melainkan bahwa paparan kebakaran gambut dapat memberi beban kesehatan dan ekonomi yang berarti dan bahwa keputusan pencegahan perlu memasukkan dampak kesehatan sebagai manfaat yang dihindari.

Pengukuran dan pemodelan baru juga membantu memperbaiki pemahaman paparan lokal. Graham et al. (2024) menggabungkan sensor PM2.5 berbiaya rendah, pemodelan kualitas udara regional, dan informasi aktivitas dalam/luar ruang untuk memperkirakan paparan asap kebakaran gambut di Kalimantan Tengah. Studi tersebut menunjukkan bagaimana kesenjangan pengukuran dapat dikurangi melalui jaringan sensor dan pemodelan terkalibrasi, serta mengingatkan bahwa rasio konsentrasi dalam dan luar ruang setempat dapat memengaruhi estimasi dosis. Temuan di satu wilayah dan musim harus diuji sebelum diterapkan di provinsi lain.

Kajian tentang kebakaran ekstrem 2019 menghubungkan emisi gambut dengan perubahan kualitas udara perkotaan dan konsekuensi kesehatan (Grosvenor et al., 2024). Studi semacam ini menegaskan bahwa perencanaan kota tidak dapat menganggap kualitas udara semata-mata persoalan lalu lintas dan industri lokal. Kota yang secara geografis jauh dari hutan dapat menerima plume dari lanskap yang terbakar, sehingga komunikasi lintas kabupaten, pemantauan regional, perlindungan sekolah, dan kesiapan layanan kesehatan menjadi penting.

Pelajaran dari episode tersebut adalah perlunya membedakan “kejadian kebakaran”, “emisi”, “konsentrasi”, “paparan”, dan “dampak kesehatan”. Luas terbakar tidak selalu sebanding dengan puncak PM2.5 yang dialami populasi karena kondisi angin, durasi pembakaran, jenis bahan bakar, dan posisi permukiman. Sebaliknya, paparan dapat meluas dari sumber api dan berlangsung sesudah kebakaran terlihat mereda. Sistem penilaian perlu mengikuti perjalanan polutan sampai ke tempat orang tinggal, belajar, bekerja, dan mengakses pelayanan.

Kasus Indonesia juga menunjukkan pentingnya kehati-hatian ketika menafsirkan statistik kesehatan. Kunjungan puskesmas dapat meningkat akibat gejala pernapasan, tetapi pencatatan dan pelaporan tidak selalu seragam. Sebagian warga mengobati diri, tidak memiliki transportasi, atau menghindari fasilitas karena biaya. Ketiadaan lonjakan rumah sakit tidak membuktikan bahwa paparan tidak berdampak; sebaliknya, kenaikan kasus pernapasan tidak otomatis menunjukkan seluruh kasus dipicu oleh asap. Penggabungan data kualitas udara, layanan, survei rumah tangga, dan bukti meteorologis memberi dasar inferensi yang lebih baik.

Ketika membandingkan episode, peneliti perlu menjelaskan definisi kejadian, cakupan waktu, polutan yang dimodelkan, resolusi spasial, dan metode penghitungan kesehatan. Penggunaan istilah “dampak” tanpa menyebut apakah yang dimaksud adalah observasi, asosiasi, atau estimasi atribusi dapat membingungkan pembaca. Dokumentasi asumsi memungkinkan pemerintah

daerah memilih tindakan yang sesuai, sekaligus memperbaiki data pada musim berikutnya.

11. Agenda pencegahan: Dari pengendalian api ke pengelolaan lanskap

Pencegahan dimulai dengan memahami bahwa kebakaran mengikuti kondisi lanskap. Peta risiko perlu menggabungkan hidrologi gambut, tutupan vegetasi, jaringan kanal dan jalan, batas desa dan konsesi, penggunaan lahan, histori api, cuaca, sumber air, serta permukiman. Peta tersebut harus diperbarui dan dipakai untuk keputusan anggaran, patroli, pemberian izin, serta penyuluhan. Penggunaan peta sekadar sebagai visualisasi tanpa mengubah keputusan tidak menghasilkan mitigasi. Setiap area prioritas perlu memiliki penanggung jawab, target, sumber daya, dan jadwal tinjau.

Perlindungan gambut yang masih utuh sering lebih efektif dan lebih murah daripada memulihkan lahan yang telah rusak. Perlindungan ini mencakup pengendalian kanal baru, penegakan ketentuan tata ruang, pengawasan kegiatan pada kubah gambut, pemeliharaan tutupan vegetasi, dan pencegahan pembukaan yang mengeringkan hidrologi. Pada gambut yang telah terdrainase, pembasahan kembali dan revegetasi perlu dirancang dengan dukungan pemilik lahan dan warga. Evaluasi terbaru terhadap intervensi restorasi memperkuat argumen bahwa tindakan pada tata air dapat mengurangi peluang kebakaran, tetapi keberhasilan sangat bergantung pada lokasi, pemeliharaan, dan implementasi yang konsisten.

Pengelolaan api harus berbeda dari sekadar larangan. Kebijakan tanpa bakar penting pada ekosistem rentan, terutama gambut, tetapi petani membutuhkan metode alternatif yang layak, aman, dan terjangkau. Pengolahan residu mekanis, kompos, mulsa, pengelolaan biomassa, alat sederhana, kelompok jasa pembukaan lahan, serta akses pembiayaan dapat mengurangi ketergantungan pada api. Program perlu memahami kalender kerja dan hak tenurial setempat. Bantuan satu kali berupa alat yang tidak dapat dipelihara

tidak cukup; perlu pelatihan, suku cadang, layanan sewa, dan pasar untuk hasil atau residu yang dikelola tanpa bakar.

Partisipasi masyarakat tidak berarti memindahkan tanggung jawab negara kepada desa dengan anggaran minim. Masyarakat Peduli Api, kelompok tani, organisasi perempuan, dan tokoh adat dapat menjadi mitra pencegahan jika dilibatkan sejak perencanaan serta diberi insentif, perlindungan, peralatan, akses data, dan ruang untuk menyampaikan pengetahuan lokal. Studi Purnomo et al. (2024) di Bengkalis, Riau, menunjukkan bahwa perubahan perilaku dan pemulihan lebih mungkin bertahan ketika warga ikut merancang tindakan, bukan hanya menjadi penerima sosialisasi. Keterlibatan perempuan juga perlu dihargai sebagai kepemimpinan substantif, bukan sekadar pelengkap kegiatan komunikasi.

Pada tingkat perusahaan, pencegahan perlu menjadi bagian dari tata kelola operasional. Rencana pengelolaan kebakaran harus mencakup sumber daya manusia, alat, air, komunikasi, patroli, pemeliharaan kanal, pembinaan kontraktor, dan hubungan dengan desa. Audit harus menilai apakah tindakan benar-benar tersedia di lapangan pada saat bahaya meningkat. Perusahaan dan pemegang izin perlu melaporkan kejadian secara tepat waktu, membuka data respons, mendukung investigasi independen, dan memperbaiki kerusakan hidrologis. Rantai pasok dapat mensyaratkan ketertelusuran hingga tingkat kebun dan prosedur keluhan yang dapat diakses masyarakat. Komitmen tanpa verifikasi tidak cukup.

Penegakan hukum perlu menyasar pelaku sesuai bukti, baik individu maupun badan usaha, dan melindungi pelapor serta saksi. Investigasi efektif memerlukan kapasitas laboratorium, pemetaan konsesi, analisis citra, pemeriksaan jejak api, dan koordinasi penyidik lingkungan. Penindakan yang tidak konsisten dapat menciptakan persepsi bahwa risiko hukum rendah. Di sisi lain, penerapan sanksi yang tidak membedakan skala, niat, kapasitas, dan bentuk tanggung jawab dapat membebani rumah tangga kecil tanpa

menghentikan sumber risiko utama. Keadilan dan konsistensi merupakan syarat efektivitas, bukan pesaingnya.

Pencegahan harus memasukkan tata kelola hak atas tanah. Kepastian tenurial yang adil dapat memperkuat insentif untuk menjaga lahan dalam jangka panjang, tetapi tidak otomatis menghilangkan risiko jika pembukaan lahan tetap memberi keuntungan. Penyelesaian tumpang tindih izin, pengakuan hak masyarakat, mediasi sengketa, dan keterbukaan peta dapat mengurangi konflik yang mendorong pembakaran. Keputusan tata ruang sebaiknya dinilai berdasarkan konsekuensi hidrologis kumulatif; pembukaan kanal kecil yang tampak terpisah dapat bersama-sama mengeringkan bentang gambut yang luas.

12. Kesiapsiagaan, pemadaman, dan perlindungan kesehatan

Kesiapsiagaan memerlukan rencana operasi yang mempertimbangkan jenis kebakaran. Api permukaan di lahan mineral, kebakaran semak, api tajuk, dan api gambut menuntut taktik serta perlengkapan yang berbeda. Pada gambut, pemadaman permukaan mungkin tidak cukup; tim perlu memastikan titik panas bawah tanah telah ditangani dan memeriksa kemungkinan penyalaan kembali. Ketersediaan air, akses kendaraan, kedalaman gambut, keselamatan personel, kualitas udara, dan cuaca harus dinilai sebelum tim masuk. Keputusan operasi harus memiliki komando insiden yang jelas dan hak menghentikan pekerjaan ketika risiko bagi petugas tidak dapat diterima.

Sistem peringatan dini perlu memiliki ambang tindakan, bukan hanya peta. Saat indeks bahaya tertentu tercapai, misalnya, patroli ditingkatkan, pembukaan lahan dihentikan sementara, sumber air diuji, puskesmas mengaktifkan rencana lonjakan kasus, sekolah menyiapkan pengalihan kegiatan, dan informasi kualitas udara diperbarui lebih sering. Protokol tersebut sebaiknya dilatih melalui simulasi sebelum musim kemarau. Latihan bersama melibatkan pemerintah desa, pemadam, TNI/Polri, BPBD, BMKG, dinas kesehatan, sekolah, perusahaan, dan kelompok masyarakat; hasil

simulasi digunakan untuk memperbaiki akses, komunikasi radio, dan pembagian wewenang.

Perlindungan kesehatan memerlukan jaringan pemantauan yang memadai dan dapat dipercaya. Sensor kualitas udara berbiaya rendah dapat menambah kepadatan pengamatan, tetapi harus dikalibrasi dan dipelihara. Pengukuran PM2.5 perlu dipahami bersama indeks kualitas udara dan sumber data. Pemerintah dapat menetapkan dashboard terbuka dengan waktu pembaruan, metode, lokasi sensor, dan penjelasan ketidakpastian. Data yang baik memungkinkan penentuan kapan kegiatan luar ruang dibatasi, kapan kelas dipindahkan, kapan ruang bersih dibuka, dan kapan kelompok berisiko perlu dihubungi langsung.

Fasilitas ruang bersih dapat disiapkan di sekolah, puskesmas, balai desa, atau gedung publik yang memiliki kemampuan membatasi masuknya udara luar dan menyaring partikulat. Ruang tersebut perlu memiliki listrik cadangan, filter yang dapat diganti, ventilasi yang dirancang dengan baik, air minum, obat dasar, jalur rujukan, dan kapasitas yang jelas. Membuka ruang tanpa mengelola udara dalam ruang hanya memberi perlindungan terbatas. Program masker perlu memperhatikan standar, kecocokan pada wajah, ketersediaan stok, cara penggunaan, dan prioritas distribusi. Kelompok rentan sebaiknya mendapat perlindungan lebih dahulu tanpa prosedur administratif yang menghambat.

Rencana kesehatan masyarakat mencakup pengawasan penyakit, klinik bergerak, penyediaan obat, jalur rujukan, pelayanan kesehatan ibu dan anak, konsultasi jarak jauh, dan dukungan kesehatan jiwa. Petugas kesehatan perlu menerima pelatihan untuk membedakan gejala iritasi ringan dari tanda bahaya yang memerlukan penanganan segera. Pencatatan harus melindungi data pribadi dan memungkinkan analisis agregat. Sektor kesehatan juga dapat membantu mengukur paparan melalui survei rumah tangga dan penggunaan alat pemantauan, sehingga kebijakan respons tidak hanya bertumpu pada jumlah kunjungan klinik.

Komunikasi risiko perlu disampaikan sebelum, selama, dan sesudah episode asap. Pesan harus menggunakan bahasa lokal, menyebut sumber data dan waktu pembaruan, menjelaskan apa yang diketahui dan belum diketahui, serta memberi tindakan yang realistis. Informasi yang berlebihan atau berubah tanpa penjelasan dapat mengikis kepercayaan. Koordinasi dengan media dan pemimpin komunitas membantu memperluas jangkauan. Penanggulangan misinformasi membutuhkan pembaruan cepat, bukan hanya koreksi setelah rumor menyebar.

13. Pemulihan dan restorasi pascakebakaran

Pemulihan dimulai dengan penilaian kerusakan yang membedakan area terbakar ringan, sedang, dan berat, serta memperhatikan apakah api mencapai lapisan gambut. Citra satelit dapat menunjukkan perubahan tutupan, tetapi pengamatan lapangan tetap penting untuk menilai kedalaman terbakar, kondisi hidrologi, regenerasi, spesies invasif, dan kebutuhan masyarakat. Penilaian awal memandu prioritas: daerah tangkapan air, habitat spesies kunci, lokasi dekat permukiman, serta area yang berisiko mengalami kebakaran ulang mendapat perhatian berbeda. Pemulihan tidak boleh hanya mengejar target tanam, sebab bibit tidak akan bertahan bila muka air tetap turun dan tekanan penggunaan lahan tidak berubah.

Rewetting dapat menurunkan risiko pembakaran dengan mempertahankan muka air, tetapi tindakan fisik perlu terhubung dengan tata kelola wilayah. Sekat kanal perlu dipelihara, dipantau, dan disepakati dengan pengguna air. Pemulihan vegetasi harus menyesuaikan karakter ekosistem, menggunakan spesies lokal, dan mempertimbangkan suksesi alami. Pada beberapa lokasi, pemulihan pasif dapat lebih tepat daripada penanaman intensif, selama tekanan api dan gangguan dikendalikan. Indikator yang relevan meliputi tinggi muka air, kelembapan tanah, tutupan vegetasi, tingkat hidup bibit, keanekaragaman, emisi, dan kejadian api berulang.

Pemulihan sosial harus berjalan bersamaan dengan restorasi ekologis. Rumah tangga kehilangan pendapatan, alat kerja, tanaman, kesehatan, dan waktu belajar; bantuan pemulihan perlu mengidentifikasi kelompok terdampak berdasarkan kebutuhan, bukan hanya alamat administratif. Skema tunai, akses kredit, bantuan input, program kerja pemulihan, dan perlindungan pekerja dapat mencegah keluarga melakukan pembukaan yang lebih berisiko. Warga perlu dilibatkan dalam pemilihan prioritas pemulihan dan mekanisme pengaduan. Bantuan yang tidak peka terhadap hak lahan dapat memperkuat ketimpangan atau mendorong konflik baru.

Evaluasi pemulihan perlu menggunakan kontrafaktual yang wajar: apa yang mungkin terjadi bila intervensi tidak dilakukan? Perbandingan antara lokasi intervensi dan lokasi serupa membantu menilai pengaruh pembasahan gambut atau program desa bebas api. Evaluasi harus mencatat kemungkinan faktor lain, seperti perubahan cuaca, harga komoditas, penegakan hukum, dan migrasi. Pengukuran perlu dilakukan lebih dari satu musim, karena satu tahun tanpa kebakaran tidak cukup membuktikan keberlanjutan. Data terbuka dan audit independen memperkuat pembelajaran dan mencegah laporan keberhasilan yang hanya berbasis aktivitas, misalnya jumlah sekat kanal yang dibangun, tanpa menilai dampaknya.

14. Tata kelola risiko kesehatan dan kelembagaan

Pencegahan memerlukan tata kelola yang menghubungkan pusat, provinsi, kabupaten, desa, masyarakat adat, perusahaan, dan lembaga regional. Pembagian peran harus jelas: siapa menetapkan peta prioritas, siapa menyediakan dana, siapa memelihara infrastruktur air, siapa memeriksa konsesi, siapa memimpin operasi, siapa membuka data, dan siapa mengevaluasi kesehatan publik. Koordinasi yang hanya berlangsung pada rapat darurat sering gagal karena aktor belum menyepakati protokol sebelum krisis. Forum rutin lintas sektor perlu membahas risiko, anggaran, data, dan tindak lanjut dengan keputusan yang dapat dipantau.

Kapasitas pemerintah daerah sangat beragam. Kabupaten dengan risiko tinggi tetapi sumber pendapatan terbatas memerlukan dukungan fiskal yang mempertimbangkan beban pencegahan, bukan hanya pembiayaan pemadaman. Transfer berbasis kinerja dapat memberi insentif apabila indikatornya mengukur outcome yang dapat diverifikasi dan tidak mendorong manipulasi. Contoh indikator: hari paparan PM2.5 tinggi, frekuensi kebakaran berulang, keberlanjutan muka air gambut, waktu respons, keselamatan personel, partisipasi masyarakat, dan penurunan praktik pembakaran. Indikator harus mempertimbangkan bahwa daerah tidak selalu dapat mengendalikan cuaca, sehingga penilaian perlu membedakan faktor eksternal dan kinerja yang berada dalam kendali.

Transparansi merupakan prasyarat akuntabilitas. Data perizinan, batas konsesi, lokasi kebakaran, hasil investigasi, sanksi, dan rencana pemulihan sebaiknya dapat diakses dalam bentuk yang dapat digunakan publik. Perlindungan privasi dan keselamatan pelapor tetap harus dijaga. Publikasi data tidak berarti menganggap pelaku bersalah sebelum pemeriksaan; justru keterbukaan prosedur membantu publik melihat bagaimana bukti diproses. Perusahaan perlu mengungkapkan peta area pengelolaan, kejadian api, langkah pemadaman, dan hasil audit dalam format standar.

Kebijakan perlu menghindari ketergantungan pada solusi teknologi tunggal. AI, penginderaan jauh, drone, sensor, dan model prediksi dapat mempercepat deteksi serta mengarahkan petugas. Namun, algoritma dapat salah mengklasifikasikan hotspot, menghasilkan bias karena data yang tidak merata, atau tidak menyelesaikan masalah hak lahan dan insentif. Sistem digital yang efektif menggabungkan keahlian ilmiah, pengetahuan lapangan, dan keputusan yang dapat dijelaskan. Petugas perlu dapat memverifikasi peringatan dan menyampaikan umpan balik agar model diperbaiki. Teknologi memperluas kapasitas manusia; ia tidak menggantikan tanggung jawab institusional.

15. Pendanaan, akuntabilitas, dan evaluasi kebijakan

Pembiayaan pencegahan harus diperlakukan sebagai investasi pengurangan kerugian, bukan beban tambahan. Perbandingan biaya perlu memasukkan biaya pemadaman berulang, kesehatan, kehilangan hasil, kerusakan karbon dan habitat, serta gangguan layanan. Manfaat pencegahan sering tersebar pada banyak sektor, sehingga kementerian lingkungan tidak dapat menanggung seluruh biaya. Anggaran bersama antara lingkungan, kesehatan, pertanian, pendidikan, pekerjaan umum, dan kebencanaan dapat mencerminkan manfaat lintas sektor. Pembiayaan jangka panjang dibutuhkan untuk pemeliharaan kanal, sensor, alat desa, pendidikan, dan layanan kesehatan, bukan hanya kegiatan proyek tahunan.

Instrumen ekonomi dapat mengubah insentif jika dirancang adil dan dapat ditegakkan. Insentif untuk praktik tanpa bakar, pembayaran jasa ekosistem, kredit restorasi, pengadaan pemerintah yang bertanggung jawab, dan standar rantai pasok dapat membantu. Namun, insentif harus menghindari pembayaran untuk kepatuhan yang seharusnya menjadi kewajiban dasar. Bantuan perlu ditargetkan pada kebutuhan dan hasil yang dapat diverifikasi. Sanksi perlu proporsional tetapi cukup kuat untuk menghilangkan keuntungan dari pembakaran. Skema berbasis hasil perlu mengantisipasi risiko kebocoran, yaitu berkurangnya api di satu lokasi tetapi meningkat di tempat lain.

Evaluasi kebijakan perlu menjawab empat pertanyaan. Apakah kegiatan dilakukan sesuai rencana? Apakah kegiatan mengubah perilaku atau kondisi hidrologi? Apakah perubahan itu mengurangi api dan paparan? Siapa yang memperoleh manfaat dan menanggung biaya? Evaluasi yang hanya menghitung pelatihan, sumur bor, patroli, atau sekat kanal mengukur output, bukan dampak. Pengukuran dampak memerlukan pembanding, data sebelum-sesudah, pengendalian faktor cuaca, dan horizon waktu yang memadai. Hasil negatif harus dipublikasikan untuk menghindari pengulangan program yang tidak efektif.

Manajemen risiko juga membutuhkan registrasi risiko yang dapat ditindaklanjuti. Setiap risiko memiliki pemilik, indikator pemicu, rencana respons, dan tanggal tinjau. Sebagai contoh, turunnya muka air pada lokasi gambut tertentu dapat memicu patroli, penghentian pembukaan, pemeriksaan kanal, dan pengiriman pompa atau peralatan. Kualitas udara yang melewati ambang tertentu dapat memicu pembatasan kegiatan luar ruang, pembukaan ruang bersih, dan distribusi informasi ke kelompok rentan. Keputusan yang dikaitkan dengan indikator mengurangi respons ad hoc dan memperjelas akuntabilitas.

Keberhasilan sebaiknya dinilai dengan ukuran yang berorientasi pada manusia dan ekosistem: semakin sedikit hari dengan paparan berbahaya, lebih sedikit kunjungan penyakit yang dapat dicegah, lebih sedikit kebakaran berulang, meningkatnya kelembapan gambut, terjaganya tutupan habitat, menurunnya kerugian rumah tangga, serta tidak adanya korban jiwa pada warga dan petugas. Ukuran ini sebaiknya dipublikasikan setiap tahun beserta definisi, sumber data, dan keterbatasannya. Rangkaian waktu jangka panjang memungkinkan publik menilai apakah kebijakan benar-benar menghasilkan ketahanan.

16. Agenda riset dan pendidikan

Kebutuhan riset mencakup pengukuran paparan lokal yang lebih baik, terutama di kota kecil dan desa dekat sumber api; validasi sensor berbiaya rendah; pemetaan kebakaran bawah permukaan; dampak kesehatan jangka panjang; pengaruh asap terhadap kehamilan dan perkembangan anak; perubahan penghidupan setelah kebakaran; dan efektivitas intervensi restorasi. Penelitian perlu mengintegrasikan ekologi, kesehatan masyarakat, ekonomi, antropologi, hukum, ilmu atmosfer, dan administrasi publik. Desain penelitian harus terbuka tentang asumsi, ketidakpastian, dan keterbatasan kausalitas.

Riset kebijakan juga perlu membandingkan variasi antarprovinsi dan antardesa. Mengapa intervensi komunitas bertahan di satu tempat tetapi tidak di tempat lain? Bagaimana kepastian tenurial memengaruhi perawatan gambut? Kapan bantuan teknologi membuat praktik tanpa bakar layak secara ekonomi? Bagaimana perusahaan dan pemerintah membagi tanggung jawab pemeliharaan hidrologis? Apa pengaruh perubahan rantai pasok terhadap perilaku pembukaan lahan? Pertanyaan-pertanyaan ini perlu dijawab dengan data kualitatif dan kuantitatif, bukan hanya indikator administratif.

AI dan analitik data dapat membantu menggabungkan citra satelit, cuaca, jaringan kanal, peta konsesi, serta laporan warga untuk memperkirakan lokasi berisiko. Model dapat mendeteksi pola hotspot dan memprioritaskan inspeksi, tetapi keputusan penegakan hukum tidak boleh diserahkan pada prediksi algoritmik saja. Validasi lapangan dan hak untuk mengoreksi data penting, terutama ketika sistem dapat memengaruhi reputasi perusahaan atau masyarakat. Sistem harus menyimpan rekam jejak sumber data dan tingkat keyakinan, serta dirancang agar pemerintah lokal dapat memahami mengapa suatu lokasi ditandai.

Pendidikan publik dapat mengajarkan hubungan antara api, gambut, kualitas udara, perubahan iklim, dan kesehatan. Kurikulum sekolah di wilayah rawan perlu memasukkan keselamatan kebakaran, literasi kualitas udara, ekologi lokal, dan keterampilan melapor. Pendidikan tinggi dapat mendorong proyek lintas disiplin yang bermitra dengan pemerintah daerah dan masyarakat. Mahasiswa manajemen dapat mengkaji tata kelola rantai pasok, pembiayaan restorasi, manajemen krisis, dan akuntabilitas organisasi. Materi pendidikan harus menghindari narasi menyalahkan satu kelompok dan menekankan bahwa pilihan kebijakan serta perilaku kolektif dapat mengurangi risiko.

Universitas dan lembaga riset juga dapat berperan sebagai penghubung pengetahuan. Mereka dapat membantu mengkalibrasi sensor, mengevaluasi hasil restorasi, menyusun peta risiko partisipatif, dan menjelaskan ketidakpastian kepada pembuat kebijakan. Kemitraan perlu memberi manfaat

balik bagi masyarakat, termasuk akses data, pelatihan, dan perlindungan atas pengetahuan lokal. Penelitian tidak seharusnya berhenti pada publikasi; hasil perlu diterjemahkan menjadi panduan operasional yang dapat digunakan dalam anggaran dan keputusan lapangan.

17. Variasi wilayah dan kebutuhan mitigasi yang berbeda

Tidak terdapat satu pola kebakaran yang menjelaskan seluruh Indonesia. Sumatra dan Kalimantan memiliki hamparan gambut luas yang banyak mengalami perubahan hidrologi dan konversi lahan. Di sana, pencegahan memerlukan pemantauan muka air, pengelolaan kanal, perlindungan kubah gambut, serta kesiapan menghadapi api bawah permukaan. Daerah yang mengalami kebakaran berulang memerlukan analisis historis yang memeriksa apakah api kembali pada lokasi yang sama, apakah terjadi perubahan akses, dan apakah pemulihan tata air benar-benar bertahan. Tanpa penilaian tersebut, patroli dapat berulang pada titik yang sama tanpa mengubah penyebabnya.

Di sebagian wilayah Nusa Tenggara dan kawasan kering lainnya, kebakaran vegetasi dapat lebih erat terkait dengan padang rumput, lahan pertanian, angin, dan musim kering. Strategi yang mengandalkan sekat kanal gambut tidak relevan di sana. Pengelolaan bahan bakar, jalur sekat bakar yang dirancang secara ekologis, pengaturan pembakaran terkendali bila diizinkan dan aman, serta perlindungan permukiman dapat lebih penting. Kebijakan harus mengenali bahwa api dapat menjadi unsur ekologi tertentu, tetapi bahaya meningkat bila intensitas dan frekuensinya berubah akibat aktivitas manusia atau perubahan iklim.

Di Jawa, tekanan penduduk dan infrastruktur dapat mempertemukan kebakaran vegetasi dengan permukiman, kawasan wisata, dan jaringan transportasi. Kebakaran di lereng gunung atau taman nasional dapat membahayakan wisatawan, relawan, dan petugas yang bekerja di medan curam. Sistem evakuasi, informasi kepada pengunjung, penutupan jalur, dan

pengendalian akses menjadi bagian dari mitigasi. Kasus yang menimbulkan korban jiwa menunjukkan perlunya protokol keselamatan operasi, pembatasan jumlah relawan tidak terlatih di zona bahaya, serta komunikasi komando yang tidak terfragmentasi.

Di Papua dan wilayah berhutan lainnya, perencanaan harus memperhatikan nilai ekologis, hak masyarakat adat, akses pelayanan yang jauh, serta kemungkinan kebakaran lokal dengan dampak yang berbeda dari episoda besar Sumatra-Kalimantan. Peta risiko nasional dapat membantu menentukan prioritas, tetapi peta tersebut perlu disesuaikan dengan pengetahuan lokal dan kondisi sosial. Keputusan tentang pembukaan lahan, pemadaman, atau restorasi harus menghormati hak dan mekanisme persetujuan masyarakat. Pendekatan yang seragam dapat menghasilkan intervensi mahal yang tidak sesuai dengan kebutuhan atau justru mengganggu mata pencaharian.

Perbedaan wilayah menuntut kerangka nasional yang menetapkan standar keselamatan, keterbukaan data, dan akuntabilitas, disertai desain lokal yang fleksibel. Setiap kabupaten rawan perlu menyusun profil risiko yang menjawab jenis bahan bakar, sumber air, sejarah kejadian, kapasitas respons, kelompok rentan, dan opsi penggunaan lahan. Profil tersebut ditinjau sebelum setiap musim kering dan setelah setiap kejadian besar. Pembelajaran antarwilayah akan lebih efektif bila praktik baik dijelaskan bersama konteksnya: apa yang berhasil, dalam kondisi apa, berapa biaya pemeliharaan, dan siapa yang mendapat manfaat.

18. Siklus sejarah kebakaran dan pembelajaran kebijakan

Sejarah kebakaran Indonesia menunjukkan pola yang berulang tetapi tidak identik. Episode besar pada 1997–1998, 2015, dan 2019 terjadi dalam konteks iklim yang kering, tetapi luas, emisi, lokasi, dan dampak dipengaruhi perubahan penggunaan lahan serta kondisi hidrologi. Kajian Page et al. (2002) mengenai kebakaran 1997 menunjukkan bahwa pembakaran gambut dapat melepaskan karbon dalam jumlah sangat besar. Kajian 2015 kemudian

memperlihatkan bahwa asap, kerusakan lahan, emisi, dan gangguan ekonomi merupakan satu paket kerugian yang saling berhubungan. Setiap episode seharusnya menjadi kesempatan untuk menilai bagaimana kebijakan mengubah keadaan sebelum episode berikutnya.

Respons pasca-krisis biasanya mencakup pengetatan aturan, pembentukan lembaga, operasi pemadaman, restorasi, dan kampanye publik. Tantangan muncul ketika perhatian menurun setelah asap hilang, sementara anggaran pemeliharaan dan pengawasan ikut berkurang. Sekat kanal yang dibangun tanpa dana perawatan, patroli yang tidak terus berjalan, atau sensor yang tidak dikalibrasi dapat kehilangan fungsi. Pengalaman sebelumnya menunjukkan bahwa pengumuman program bukan bukti bahwa risiko telah berkurang; hasil harus diukur pada muka air, kejadian api, kualitas udara, dan kesehatan.

Kajian biaya dan manfaat restorasi oleh Kiely et al. (2021) memperkirakan bahwa skenario pemulihan gambut tertentu berpotensi mengurangi luas terbakar, emisi, dan kematian prematur pada episode historis. Temuan tersebut merupakan hasil pemodelan kontrafaktual, bukan pengukuran langsung semua manfaat restorasi yang telah selesai. Perbedaan ini penting: model membantu menilai potensi, sementara evaluasi lapangan menguji capaian nyata. Kebijakan harus menggunakan kedua jenis bukti dan menjelaskan batas inferensinya.

Pelajaran sejarah juga berhubungan dengan memori sosial. Warga yang mengalami beberapa musim asap mungkin menormalisasi kondisi berbahaya, mengurangi kepercayaan pada peringatan, atau menganggap tidak ada pilihan selain bertahan. Pemerintah perlu mendokumentasikan pengalaman tersebut dan menindaklanjuti pengaduan. Evaluasi pascakebakaran yang melibatkan masyarakat dapat mengungkap bagaimana bantuan didistribusikan, apakah layanan kesehatan terjangkau, apakah sekolah memiliki protokol, dan apakah upaya pemadaman mengabaikan keselamatan warga.

Pembelajaran kebijakan memerlukan mekanisme tetap. Setelah kejadian besar, tim independen dapat menyusun laporan kejadian yang merangkum

kronologi, keputusan, penggunaan data, kinerja, korban, biaya, hambatan koordinasi, dan tindakan perbaikan. Rekomendasi harus memiliki penanggung jawab serta tenggat. Publikasi laporan menjadi sarana pertanggungjawaban sekaligus sumber pembelajaran bagi provinsi lain. Bila rekomendasi lama terus muncul tanpa pelaksanaan, masalahnya bukan kekurangan pengetahuan, melainkan kapasitas, insentif, atau kemauan untuk bertindak.

19. Model operasional pencegahan lintas sektor

Model operasional yang dapat diterapkan pemerintah daerah memiliki tiga lapisan. Lapisan pertama adalah pengurangan kondisi mudah terbakar melalui perlindungan hutan dan gambut, pengelolaan air, pembatasan pembukaan berisiko, serta dukungan usaha tanpa bakar. Lapisan kedua adalah deteksi dan kesiapsiagaan melalui pemantauan cuaca, sensor, patroli, sumber air, pelatihan, dan kesiapan layanan publik. Lapisan ketiga adalah respons dan pemulihan yang mengutamakan keselamatan, kesehatan, pengendalian api, rehabilitasi, dan dukungan penghidupan. Ketiganya saling melengkapi; kekuatan lapisan respons tidak dapat menutup kelemahan pencegahan struktural.

Pada awal tahun, pemerintah daerah dapat menetapkan peta prioritas dan meninjau rencana tata ruang, konsesi, dan hidrologi. Sebelum musim kemarau, dinas terkait memeriksa sekat kanal, sumur, alat pemadam, jalur komunikasi, rumah sakit, ruang bersih, sekolah, dan stok obat. Saat indikator bahaya meningkat, pemerintah mengaktifkan patroli dan pembatasan aktivitas berisiko, mengirimkan peringatan kepada warga, serta menghubungkan data kualitas udara dengan keputusan kesehatan dan pendidikan. Setelah api padam, tim menilai kerusakan, memulihkan tata air, memberi dukungan sosial, serta meninjau apakah respons sesuai rencana.

Pembagian peran dapat diringkas sebagai berikut: BMKG memberi prakiraan dan informasi meteorologi; dinas lingkungan dan kehutanan mengelola data lanskap dan penegakan sesuai kewenangan; BPBD mengoordinasikan

kesiapsiagaan dan operasi darurat; dinas kesehatan mengelola pemantauan penyakit dan layanan; pemerintah desa memobilisasi pengetahuan dan relawan lokal; perusahaan mengelola risiko di wilayah operasi serta mendukung lanskap sekitar sesuai kewajiban; lembaga pendidikan menjalankan protokol keselamatan belajar; dan organisasi masyarakat sipil mengawasi serta membantu menjangkau kelompok rentan. Pengaturan ini memerlukan SOP bersama dan satu peta data yang diperbarui.

Dalam operasi, struktur komando harus menentukan siapa yang berwenang menetapkan zona aman, memerintahkan evakuasi, menghentikan pekerjaan, dan mengalokasikan sumber daya. Relawan memerlukan identifikasi, pelatihan dasar, perlindungan asuransi, komunikasi, serta arahan yang jelas. Petugas tidak boleh ditempatkan pada kondisi yang melampaui kemampuan alat atau pelatihannya. Keselamatan bukan sekadar penggunaan helm dan masker; ia juga mencakup pengamatan cuaca, rute keluar, hidrasi, rotasi tugas, komunikasi radio, pemeriksaan kesehatan, serta pencatatan insiden nyaris celaka.

Setiap kabupaten dapat membangun dashboard kinerja yang menampilkan indikator awal, proses, dan hasil. Indikator awal meliputi curah hujan, muka air, dan indeks bahaya; indikator proses mencakup kecepatan respons, cakupan patroli, dan fungsi alat; indikator hasil meliputi luas terbakar, hari dengan udara tidak sehat, gangguan sekolah, kasus kesehatan, kematian, dan kejadian berulang. Dengan cara ini, pejabat dapat membedakan apakah kegagalan berasal dari prakiraan, koordinasi, sumber daya, kepatuhan, atau desain intervensi.

20. Pengukuran paparan, epidemiologi, dan ketidakpastian

Penilaian paparan PM2.5 dimulai dengan pengukuran massa partikel pada titik dan rentang waktu tertentu. Monitor referensi atau ekuivalen memberi data dengan kendali mutu yang ketat, tetapi biaya dan kebutuhan operasional membatasi kepadatan jaringan. Sensor optik berbiaya rendah

dapat memperluas cakupan, terutama di sekitar permukiman yang dekat kebakaran, namun data perlu dikoreksi atau dibandingkan dengan alat rujukan. Kelembapan tinggi, karakter aerosol, pengotoran sensor, dan lokasi pemasangan dapat memengaruhi pembacaan. Angka sensor yang tidak disertai metadata jangan diperlakukan seolah-olah presisi laboratorium.

Pengukuran ambien tidak menggambarkan seluruh paparan personal. Pemantauan individu, catatan aktivitas, survei waktu di dalam dan luar ruang, serta rasio dalam/luar ruang dapat membantu menjembatani konsentrasi dengan paparan. Namun, pemantauan personal mahal dan dapat merepresentasikan kelompok kecil. Sensor dalam rumah dan luar rumah memberi pemahaman tentang infiltrasi, tetapi perlu memperhitungkan kegiatan memasak, asap rokok, debu, ventilasi, dan sumber dalam ruang lain yang dapat menyumbang PM2.5.

Model atmosfer mengestimasi emisi kebakaran dan transportasi untuk wilayah yang tidak memiliki monitor. Model menggabungkan inventaris kebakaran, data satelit, cuaca, sifat emisi, kimia atmosfer, dan topografi. Ketidakpastian dapat bertambah bila api gambut bawah permukaan tidak terdeteksi, kedalaman pembakaran tidak diketahui, atau faktor emisi tidak sesuai bahan bakar lokal. Perbandingan model dengan sensor lapangan memperbaiki estimasi; penelitian Graham et al. (2024) memberi contoh pemaduan pengamatan sensor dan model regional untuk konteks gambut Indonesia.

Dalam epidemiologi, peneliti menghubungkan perubahan paparan dengan perubahan hasil kesehatan menurut waktu dan tempat. Rancangan deret waktu, case-crossover, kohort, dan pemodelan spasial menjawab pertanyaan yang berbeda. Rancangan yang memanfaatkan variasi waktu dalam lokasi yang sama dapat mengurangi sebagian perancu yang tidak berubah, tetapi tetap perlu mengendalikan musim, suhu, tren penyakit, infeksi, dan polutan lain. Gould et al. (2024) menyoroti bahwa temuan lintas studi cenderung lebih

konsisten untuk mortalitas semua sebab dan rawat inap pernapasan daripada beberapa hasil kardiovaskular.

Bias paparan dapat muncul bila PM2.5 total dipakai sebagai pengganti PM2.5 khusus kebakaran. Di kota, sumber lalu lintas dan industri dapat bercampur dengan asap; di daerah pedesaan, pembakaran rumah tangga dapat menambah paparan. Atribusi membutuhkan indikator kebakaran, pemodelan sumber, komposisi kimia, atau pendekatan statistik yang dapat memisahkan sinyal asap. Kesalahan atribusi cenderung mengaburkan hubungan, tetapi juga dapat menghasilkan estimasi yang terlalu tinggi atau terlalu rendah bergantung pada pola data.

Interpretasi hubungan kesehatan harus membedakan korelasi, asosiasi, efek kausal, dan atribusi. Kenaikan gejala yang terjadi bersamaan dengan asap tidak dengan sendirinya membuktikan sebab, terutama jika infeksi atau panas juga meningkat. Sebaliknya, studi yang tidak menemukan asosiasi kuat dapat memiliki daya statistik kecil, paparan yang salah ukur, atau hasil kesehatan yang tidak tercatat. Sintesis bukti menilai konsistensi, kekuatan desain, dosis-respons, plausibilitas, dan keterbatasan, bukan memilih satu studi yang paling sesuai dengan harapan.

Estimasi beban yang diatribusikan kepada PM2.5 menggunakan fungsi paparan-respons yang mungkin berasal dari populasi dan sumber polusi lain. Penerapan fungsi tersebut ke asap gambut Indonesia dapat membawa ketidakpastian karena komposisi dan konteks berbeda. Model perlu melakukan analisis sensitivitas, menyatakan fungsi yang dipilih, dan memberikan rentang estimasi. Ketidakpastian bukan alasan untuk tidak bertindak; ia adalah informasi mengenai mutu bukti dan prioritas penelitian berikutnya.

Penelitian perlu menghindari penghitungan ganda, misalnya menjumlahkan hasil beberapa luaran yang tumpang tindih atau menganggap kunjungan klinik dan rawat inap sebagai orang berbeda. Data kematian, rumah sakit, puskesmas, survei gejala, dan pengobatan mandiri memiliki cakupan yang

tidak sama. Metadata dan definisi kasus harus tersedia agar temuan dapat dibandingkan. Pelaporan terbuka tentang kode, kalibrasi, resolusi, dan asumsi meningkatkan replikasi dan kepercayaan publik.

Kesenjangan data juga merupakan temuan kebijakan. Jika kualitas udara tidak diukur di desa yang paling dekat dengan api, ketidakpastian bukan alasan untuk menganggap tidak ada paparan; hal itu menunjukkan kebutuhan investasi pemantauan. Jika fasilitas kesehatan tidak menyimpan data episode asap secara konsisten, dampak mungkin tidak terlihat dalam laporan rutin. Pemerintah dan peneliti dapat menerapkan tindakan pencegahan yang proporsional sambil memperbaiki data dan melibatkan masyarakat dalam evaluasi.

21. Keadilan, etika, dan kepercayaan publik

Keadilan lingkungan menanyakan distribusi risiko dan manfaat. Sering kali masyarakat yang bergantung pada lahan menghadapi aturan penggunaan yang ketat, sementara keputusan investasi dan perubahan hidrologi ditetapkan pada tingkat yang lebih tinggi. Di sisi lain, masyarakat juga dapat menggunakan api yang menimbulkan risiko bagi tetangga. Kebijakan yang adil tidak menghapus tanggung jawab, tetapi menilai kapasitas, motif, dampak, dan pilihan yang tersedia. Ia memastikan bahwa bantuan untuk alternatif tanpa bakar tidak hanya diberikan kepada pelaku yang paling mudah dijangkau, dan bahwa proses penegakan hukum tidak selektif.

Persetujuan dan partisipasi bermakna ketika warga dapat memengaruhi rancangan, anggaran, dan evaluasi, bukan hanya menghadiri sosialisasi. Masyarakat perlu mendapat informasi yang dapat dipahami tentang peta lahan, rencana tata air, risiko kesehatan, jalur pengaduan, dan mekanisme kompensasi. Pengetahuan adat mengenai kondisi air, angin, vegetasi, dan sejarah api dapat melengkapi data ilmiah. Namun, pengetahuan tersebut tidak boleh dieksploitasi tanpa persetujuan, pengakuan, atau manfaat bagi pemiliknya.

Komunikasi krisis juga merupakan persoalan etika. Pemerintah dan media harus menyampaikan informasi cepat, tetapi tidak boleh mengklaim kepastian yang belum didukung bukti. Data yang berubah perlu dijelaskan melalui catatan revisi. Informasi mengenai penyebab kebakaran harus membedakan dugaan, hasil penyelidikan, dan putusan. Klaim kesehatan perlu menghindari kepanikan sekaligus tidak mengecilkan bahaya. Kepercayaan publik tumbuh ketika pesan konsisten, kanal umpan balik tersedia, dan koreksi dilakukan terbuka.

Perlindungan kelompok rentan harus diwujudkan dalam anggaran. Ruang bersih, masker yang layak, layanan kesehatan, transportasi evakuasi, pembelajaran pengganti, dan dukungan pendapatan memerlukan pembiayaan nyata. Bila keluarga diminta membatasi aktivitas luar rumah, pemerintah perlu memperhatikan pekerja yang bergantung pada penghasilan harian. Bila sekolah ditutup, anak yang tidak memiliki koneksi digital memerlukan opsi belajar yang aman. Bila warga dievakuasi, kebutuhan disabilitas, lansia, ibu hamil, serta hewan ternak perlu direncanakan.

Kepercayaan terhadap kebijakan dapat rusak ketika pesan pencegahan tidak sejalan dengan keputusan perizinan atau pembangunan. Pemerintah perlu memperlihatkan bahwa standar keselamatan berlaku untuk semua pemegang hak dan pelaku. Transparansi hasil investigasi dan tindak lanjut pemulihan membantu memperkuat legitimasi. Pada saat yang sama, kebijakan tidak boleh mengubah kelompok masyarakat menjadi kambing hitam untuk menutupi kelemahan tata kelola. Keadilan dan efektivitas berjalan bersama ketika setiap pihak memahami kewajiban serta memiliki jalur untuk memenuhi kewajiban tersebut.

22. Kesiapan layanan kesehatan untuk kelompok rentan

Kesiapan layanan kesehatan dimulai sebelum musim kering. Dinas kesehatan perlu memetakan puskesmas, rumah sakit, bidan praktik, posyandu, layanan gawat darurat, farmasi, oksigen, listrik cadangan, dan jalur rujukan; kemudian

mengidentifikasi kesenjangan geografis dan aksesibilitas. Rencana harus mencakup peningkatan kunjungan pernapasan dan kardiovaskular, kebutuhan pasien kehamilan, pengantaran obat, serta kontinuitas pelayanan penyakit kronis. Puskesmas dapat memasukkan prakiraan asap ke rapat kesiapsiagaan musiman dan menetapkan kapan kapasitas staf, persediaan, atau jam layanan perlu diperluas.

Sistem surveilans yang baik menggabungkan indikator lingkungan dan kesehatan dengan interval waktu yang konsisten. Data PM2.5 atau indeks kualitas udara dapat dipasangkan dengan kunjungan klinik, panggilan darurat, rawat inap, kelahiran, dan ketidakhadiran layanan antenatal. Analisis harus mempertimbangkan hari dalam pekan, infeksi musiman, suhu, hujan, dan perubahan perilaku mencari layanan. Data individu yang sensitif perlu diamankan dan hanya digunakan untuk tujuan kesehatan yang sah. Peringatan publik berbasis ambang lokal sebaiknya transparan mengenai metodenya, karena ambang komunikasi tidak selalu sama dengan pedoman kualitas udara jangka panjang WHO.

Layanan primer membutuhkan protokol praktis untuk mengenali gejala, menilai risiko, memberi nasihat pengurangan paparan, dan merujuk pasien bila diperlukan. Tenaga kesehatan tidak perlu menganggap semua keluhan sebagai akibat asap, tetapi perlu menanyakan paparan saat kualitas udara memburuk. Penderita asma atau penyakit paru kronis dapat meninjau rencana tindakan dan akses obat dengan tenaga kesehatan. Untuk ibu hamil, layanan antenatal dapat membahas paparan, kesehatan pernapasan, jadwal kunjungan, transportasi, dan cara menghubungi fasilitas bila terjadi gangguan. Konseling harus mendukung pengambilan keputusan tanpa menghakimi atau mengubah terapi tanpa penilaian klinis.

Lansia yang tinggal sendiri atau memiliki keterbatasan mobilitas perlu menjadi bagian dari daftar kesiapsiagaan komunitas dengan persetujuan dan perlindungan data. Kader, petugas sosial, keluarga, serta pengelola panti dapat menyepakati mekanisme pemeriksaan kondisi harian, penyampaian

pesan melalui telepon atau kunjungan, transportasi, dan rujukan. Kesiapan harus menjangkau orang dengan gangguan pendengaran, penglihatan, kognitif, bahasa, atau akses telepon. Panti wreda dan fasilitas rawat jangka panjang perlu menilai filtrasi, pendinginan, cadangan listrik, obat rutin, ruang perlindungan, dan rencana evakuasi yang mempertahankan kebutuhan perawatan.

Perlindungan ibu hamil memerlukan kesinambungan layanan maternal-neonatal sepanjang episode asap. Fasilitas perlu menyiapkan jalur komunikasi untuk perubahan jadwal, transportasi ke pemeriksaan dan persalinan, akses rekam medis, dan rujukan ketika kondisi klinis mendesak. Bidan dan kader dapat menyampaikan informasi menggunakan bahasa yang dipahami komunitas dan menjelaskan kapan konsultasi dibutuhkan. Kebijakan tidak boleh mengalihkan semua tanggung jawab kepada perempuan untuk tinggal di rumah; pekerjaan, pengasuhan anak, dan kondisi rumah membatasi pilihan sebagian keluarga.

Ruang udara bersih di klinik, balai warga, sekolah, atau gedung pemerintah dapat menyediakan perlindungan sementara bagi orang yang rumahnya tidak dapat menjaga kualitas udara. Pemilihan lokasi perlu mempertimbangkan filtrasi, pendinginan, kapasitas, akses kursi roda, toilet, obat, area istirahat, privasi, keamanan, serta jarak dari kelompok sasaran. Petugas shelter harus memantau kualitas udara dalam ruang dan suhu, menjaga sirkulasi sesuai kebutuhan, serta menghindari kepadatan berlebih. Jika bangunan terlalu panas atau tidak mempunyai ventilasi dan filtrasi yang sesuai, ia mungkin tidak memberikan perlindungan yang diharapkan.

Kesiapan obat dan alat perlu dipastikan secara hati-hati. Oksigen, inhaler, spacer, nebulisasi jika memang tersedia dan sesuai protokol, alat pengukur tanda vital, serta obat yang diresepkan merupakan bagian dari kesiapan klinis. Sistem rantai pasok perlu mempertimbangkan lonjakan permintaan dan kemungkinan gangguan transportasi. Tenaga kesehatan perlu melindungi diri saat memberikan layanan di lingkungan berasap, dan

prosedur penggunaan alat pelindung mengikuti jenis pekerjaan serta aturan keselamatan kerja.

Peningkatan kapasitas kesehatan tidak dapat berdiri sendiri. Perencanaan puskesmas harus berkoordinasi dengan BPBD, dinas lingkungan, pendidikan, transportasi, pekerjaan, organisasi penyandang disabilitas, kelompok lansia, organisasi profesi, dan masyarakat. Simulasi pra-musim menguji jalur rujukan, daftar warga yang perlu dihubungi, alur pesan, penempatan ruang udara bersih, serta kemampuan memperoleh bantuan. Setelah episode berakhir, tinjauan bersama mengidentifikasi layanan yang terlewat dan memperbarui rencana.

23. Perubahan mata pencaharian dan ekonomi tanpa bakar

Larangan penggunaan api akan memiliki legitimasi dan hasil yang lebih baik bila didukung pilihan ekonomi yang dapat dijalankan. Pemerintah dan perusahaan dapat membantu kelompok tani memperoleh mesin pencacah, alat pengolah tanah, kompos, layanan sewa, serta akses ke tenaga kerja dan pembiayaan. Model layanan bersama sering lebih masuk akal bagi petani kecil daripada mewajibkan setiap rumah tangga membeli mesin sendiri. Pengelolaan residu dapat mengubah biomassa menjadi mulsa atau kompos, tetapi pilihan tersebut perlu mempertimbangkan tenaga, waktu, kualitas tanah, musim, dan pasar hasil samping.

Analisis biaya perlu memperhitungkan bukan hanya biaya membeli alat, tetapi juga biaya operasi, perawatan, bahan bakar, suku cadang, pelatihan, dan koordinasi. Subsidi yang hanya menurunkan harga alat tanpa memperbaiki ketersediaan jasa mungkin tidak mengubah perilaku. Pemerintah dapat mendukung koperasi atau badan usaha milik desa sebagai penyedia jasa pembukaan lahan tanpa bakar, dengan standar keselamatan, tarif transparan, dan mekanisme pemeliharaan. Dukungan tersebut harus dirancang berdasarkan kebutuhan setempat serta tidak menciptakan utang yang tidak seimbang dengan pendapatan petani.

Kelayakan ekonomi juga bergantung pada hak atas lahan. Petani yang tidak memiliki kepastian akses jangka panjang mungkin kurang memiliki insentif untuk berinvestasi pada pengolahan tanah dan pemeliharaan hidrologi. Penyelesaian sengketa dan pengakuan hak yang sah dapat memperkuat kepastian, tetapi penataan tersebut harus disertai perlindungan hutan dan gambut. Proses formal tidak boleh menghapus hak masyarakat atau membuka ruang spekulasi baru. Pemerintah perlu menyediakan saluran mediasi yang dapat dipercaya dan peta batas yang transparan.

Rantai nilai komoditas dapat mendukung perubahan jika pembeli menawarkan hubungan dagang yang memberi penghargaan pada praktik baik. Kontrak jangka lebih panjang, bantuan teknis, harga yang dapat diprediksi, dan keterlacakan pemasok meningkatkan kemungkinan petani mempertahankan metode tanpa bakar. Sebaliknya, tuntutan sertifikasi yang mahal tanpa premi harga dapat mengecualikan petani kecil dan membuat pasar terkonsentrasi. Kebijakan keberlanjutan perlu menggabungkan standar dengan pembiayaan transisi, penyuluhan, dan akses pasar, serta melindungi kelompok yang paling kecil kapasitasnya.

Diversifikasi penghidupan dapat mengurangi ketergantungan pada satu komoditas atau satu bentuk pembukaan lahan. Pilihan seperti produk hutan bukan kayu, agroforestri yang sesuai dengan hidrologi, perikanan pada lanskap basah, jasa restorasi, atau usaha lokal perlu dinilai berdasarkan kondisi ekologis dan budaya. Tidak semua alternatif menghasilkan pendapatan setara dalam jangka pendek. Karena itu, masa transisi dapat membutuhkan pembayaran jasa ekosistem, program padat karya, atau pembelian hasil lokal oleh pemerintah. Ukuran keberhasilan mencakup pendapatan bersih, keamanan pangan, waktu kerja, partisipasi perempuan, dan penurunan penggunaan api, bukan jumlah pelatihan semata.

24. Peran perusahaan, investor, dan rantai pasok

Tanggung jawab pengelolaan risiko melekat pada keputusan operasional. Perusahaan yang mengelola kebun atau hutan tanaman perlu memastikan wilayah konsesi memiliki rencana pencegahan yang diperbarui, petugas yang cukup, sumber air yang berfungsi, kanal yang dikelola, jalur patroli, dan komunikasi dengan masyarakat sekitar. Prosedur harus menjangkau kontraktor dan pemasok, sebab pengendalian yang hanya berlaku pada pekerja langsung meninggalkan celah. Audit independen dapat menguji bukti pemeliharaan, latihan, respons, laporan kejadian, dan pemulihan; dokumen kebijakan tanpa bukti pelaksanaan tidak cukup.

Investor dan pemberi pinjaman dapat mengintegrasikan risiko kebakaran dan gambut ke dalam uji tuntas. Penilaian perlu melihat eksposur fisik perusahaan, kepatuhan hukum, ketergantungan pada drainase, potensi gangguan operasi, risiko reputasi, dan dampak terhadap warga. Mekanisme keluhan yang mudah diakses membantu mengidentifikasi masalah sebelum eskalasi. Bila ditemukan indikasi pelanggaran, tindak lanjut harus berbasis bukti dan memiliki tahapan verifikasi, perbaikan, serta sanksi. Transparansi risiko tidak sama dengan menyimpulkan kesalahan sebelum investigasi selesai.

Perusahaan dapat mempublikasikan data kebakaran dengan metodologi yang jelas: koordinat, tanggal, area, tipe lahan, tindakan pemadaman, hasil pemeriksaan, dan status pemulihan. Data tersebut perlu disandingkan dengan sumber pemerintah dan pengamatan independen. Peta konsesi yang akurat membantu penentuan kewenangan dan mempercepat respons, sementara perlindungan saksi dan privasi tetap dijaga. Keterbukaan juga memungkinkan perusahaan belajar dari kejadian yang terjadi di wilayah tetangga, karena kebakaran dapat melintasi batas pengelolaan.

Prinsip tanggung jawab perlu mencakup pencegahan, respons, dan pemulihan. Pelaku yang terbukti menimbulkan kebakaran dapat diminta memulihkan kondisi hidrologi, membayar kerugian sesuai ketentuan, memperbaiki praktik, dan mendukung pemantauan jangka panjang. Kompensasi kepada warga

harus menggunakan prosedur yang sederhana, cepat, dan dapat diajukan tanpa biaya tinggi. Penyelesaian administratif atau perdata tidak menggantikan penyelidikan pidana jika terdapat bukti tindak pidana; sebaliknya, proses hukum harus menjaga hak semua pihak dan menghindari penghukuman berdasarkan dugaan semata.

Konsistensi rantai pasok dapat mencegah pemindahan risiko. Bila pembeli hanya memutus hubungan setelah muncul sorotan media, pemasok dapat berganti nama atau beralih ke pasar yang tidak menuntut transparansi. Pendekatan bertahap dapat menggabungkan keterlacakan, dukungan perbaikan, tenggat, dan sanksi untuk pelanggaran berulang atau berat. Pemutusan hubungan dagang harus mempertimbangkan apakah tindakan itu memperbaiki kondisi lapangan atau hanya memindahkan sumber masalah ke pemasok lain. Transparansi hasil dan verifikasi independen membantu membedakan komitmen nyata dari komunikasi reputasi.

25. Kerja sama kesehatan dan pertukaran data lintas batas

Asap lintas batas menciptakan kepentingan bersama bagi Indonesia dan negara-negara ASEAN. Kerja sama dapat mencakup pertukaran prakiraan, data kualitas udara, informasi kebakaran, pemantauan emisi, pelatihan petugas, bantuan teknis, dan tata cara mobilisasi sumber daya. Perjanjian regional akan lebih efektif bila prosedurnya diuji dalam latihan, termasuk standar komunikasi, titik kontak, akses personel dan peralatan, pembagian biaya, serta koordinasi dengan otoritas nasional dan daerah. Bantuan harus dapat diterima dengan cepat tanpa mengabaikan komando Indonesia atas operasi di wilayahnya.

Kepercayaan regional tergantung pada kualitas informasi. Negara yang terpapar asap memerlukan data yang diperbarui dan dapat dibandingkan; negara sumber memerlukan pemahaman bahwa variasi sensor dan metode dapat menghasilkan angka berbeda. Portal bersama dapat menampilkan prakiraan angin, lokasi kebakaran, emisi, indeks pencemaran, dan langkah respons. Ketidaksepakatan tentang angka sebaiknya ditangani melalui

pertukaran metadata dan verifikasi, bukan saling menyalahkan di ruang publik. Komunikasi yang transparan meningkatkan kredibilitas respons nasional.

Diplomasi tidak boleh hanya berlangsung pada saat asap memuncak. Forum kerja sama dapat membahas pembiayaan pencegahan, pelatihan, perlindungan kesehatan, penelitian lintas batas, dan dukungan pada masyarakat yang mengelola gambut. Negara penerima dampak dapat berkontribusi melalui dukungan teknis, investasi restorasi, dan komitmen rantai pasok yang bertanggung jawab. Pembagian manfaat dan biaya perlu dibicarakan dengan menghormati kedaulatan serta tanggung jawab negara, dan tidak mengubah kerja sama menjadi alat untuk memindahkan beban kepada komunitas lokal.

Untuk Indonesia, koordinasi lintas batas juga memiliki manfaat operasional langsung. Bantuan helikopter, pesawat, tenaga ahli, atau peralatan dapat menambah kapasitas ketika lokasi dan kondisi memungkinkan. Namun, kebutuhan harus ditentukan oleh komandan operasi, bukan hanya tawaran aset. Water bombing pada wilayah gambut yang luas tidak selalu menyelesaikan api bawah permukaan; pemadaman darat, pembasahan, akses sumber air, dan verifikasi titik panas tetap diperlukan. Evaluasi gabungan dapat mencatat aset yang digunakan, lokasi intervensi, hasil, risiko, serta pelajaran untuk musim berikutnya.

Kebijakan regional paling kuat ketika dikaitkan dengan pengurangan sumber risiko. Kerja sama ilmiah dapat membantu mengevaluasi emisi, pemaparan, dan manfaat restorasi. Kerja sama ekonomi dapat mendorong komoditas yang diproduksi tanpa merusak gambut. Pendidikan publik regional dapat mengurangi misinformasi dan meningkatkan pemahaman tentang perbedaan antara sumber api, penyebaran asap, dan dampak kesehatan. Diplomasi pencegahan membutuhkan kesinambungan politik, bukan hanya pernyataan solidaritas setelah bencana terjadi.

26. Kerangka pelaksanaan bertahap untuk pemerintah daerah

Pemerintah daerah dapat menyusun pelaksanaan dalam tiga horizon. Dalam jangka pendek, sebelum musim kering, langkah prioritas mencakup pemutakhiran peta risiko, pemeriksaan tata air, penempatan alat, penguatan MPA, latihan evakuasi, pengadaan obat dan masker, serta protokol sekolah dan kerja luar ruang. Risiko tinggi yang terlihat dari kombinasi prakiraan kering, muka air turun, dan histori api perlu memicu tindakan awal. Penanggung jawab, kebutuhan biaya, dan jalur koordinasi harus ditetapkan dalam dokumen operasi yang dapat dipakai oleh semua dinas.

Dalam jangka menengah, pemerintah memperbaiki prasyarat struktural: menyelesaikan konflik data batas, menata perizinan, mengembangkan layanan mekanis untuk pembukaan tanpa bakar, memelihara sekat kanal, memperluas pemantauan PM2.5, dan membangun mekanisme bantuan mata pencaharian. Pemerintah dapat memilih beberapa desa sebagai lokasi percontohan, tetapi pemilihan harus mewakili variasi gambut, mata pencaharian, akses, dan kapasitas. Hasil uji coba diumumkan bersama biaya dan hambatan, agar model yang diperluas sesuai kondisi nyata.

Dalam jangka panjang, pembaruan tata ruang, pengembangan ekonomi daerah, investasi infrastruktur, dan program adaptasi iklim perlu memasukkan risiko kebakaran. Jalan dan kanal baru harus dinilai menurut dampak kumulatif terhadap hidrologi serta akses penyalaan. Perencanaan pusat dan daerah perlu menggunakan skenario iklim yang lebih kering dan ekstrem. Daerah dapat mengembangkan pembiayaan berkelanjutan melalui anggaran multi-tahun, dana lingkungan, kemitraan rantai pasok, dan kerja sama riset, dengan audit penggunaan yang terbuka.

Setiap horizon perlu mempunyai indikator. Jangka pendek: persentase wilayah prioritas yang memiliki rencana aktif, kesiapan air, dan protokol kesehatan; waktu antara peringatan dan patroli; serta ketersediaan informasi kualitas udara. Jangka menengah: perubahan praktik penggunaan api, kondisi muka air, jumlah kebakaran berulang, pemeliharaan alat, serta akses alternatif

ekonomi. Jangka panjang: tren luas dan intensitas kebakaran, hari paparan berbahaya, emisi, kehilangan habitat, kerugian rumah tangga, dan keselamatan. Indikator harus diterbitkan dengan baseline dan definisi agar dapat dibandingkan antar-tahun.

Rencana bertahap perlu memiliki mekanisme koreksi. Bila dukungan alat tidak digunakan, pemerintah harus mengetahui apakah masalahnya biaya operasi, keterampilan, atau konflik tenurial. Bila kebakaran berpindah ke luar wilayah program, analisis perlu memeriksa kebocoran. Bila kualitas udara tetap buruk meskipun luas kebakaran menurun, penilaian perlu melihat lokasi api, jenis bahan bakar, durasi, dan arah angin. Pengelolaan adaptif mengubah desain berdasarkan bukti, bukan mempertahankan program hanya karena telah dianggarkan.

Keterlibatan warga dalam pemantauan dapat memperkuat akuntabilitas, tetapi partisipasi sebaiknya tidak hanya diukur dari jumlah rapat. Masyarakat perlu mengetahui keputusan apa yang dibuat berdasarkan masukan mereka. Mekanisme umpan balik dapat berupa laporan berkala, forum desa, nomor pengaduan, dan peta partisipatif. Keputusan yang memengaruhi lahan atau akses warga harus disertai penjelasan, konsultasi, dan jalur banding. Dengan cara ini, pencegahan menjadi bagian dari tata kelola pembangunan daerah, bukan proyek musiman.

27. Kerangka hukum dan pelaksanaan kebijakan

Kerangka hukum menjadi efektif bila norma dapat diterjemahkan menjadi keputusan operasional. Aturan tentang perlindungan hutan, pengendalian pencemaran, pengelolaan gambut, tata ruang, perkebunan, dan kebencanaan membentuk lapisan kewajiban yang beririsan. Petugas perlu memahami hubungan antarketentuan, batas kewenangan, prosedur pembuktian, serta saluran koordinasi. Ketidakjelasan tentang siapa yang memeriksa, siapa yang menindak, dan siapa yang memulihkan dapat memperlambat tindakan. Pemerintah daerah dapat menyusun panduan terpadu yang merujuk pada

ketentuan resmi dan memperjelas alur administrasi tanpa menggantikan peraturan yang berlaku.

Penegakan yang efektif memiliki unsur pencegahan, pemeriksaan, sanksi, pemulihan, dan pembelajaran. Sanksi tanpa pengawasan yang mungkin terjadi hanya memiliki daya cegah terbatas. Pemeriksaan yang baik memerlukan kapasitas teknis untuk memeriksa lokasi api, perubahan lahan, dokumen izin, hubungan kontraktual, dan kepatuhan terhadap rencana pengelolaan. Pemulihan harus memastikan tata air dan fungsi ekosistem diperbaiki, bukan hanya membayar denda. Hasil penegakan perlu diumumkan dalam bentuk yang dapat dipahami, dengan membedakan dugaan awal, proses penyidikan, putusan, serta tindakan korektif.

Asas keadilan mensyaratkan proses yang konsisten dan hak pihak yang diperiksa. Masyarakat harus memiliki akses terhadap bantuan hukum dan mekanisme banding jika menghadapi tindakan administratif. Perusahaan harus diberikan ruang untuk menyampaikan bukti, tetapi proses tersebut tidak boleh menjadi alasan menunda tindakan perlindungan yang mendesak. Ketika bukti belum cukup untuk menentukan pelaku, pemerintah tetap dapat menjalankan langkah keselamatan dan pemadaman yang proporsional sambil melanjutkan investigasi. Dengan demikian, kepastian hukum dan perlindungan publik berjalan bersamaan.

Kebijakan penggunaan lahan perlu menguji dampak kumulatif, bukan menilai izin satu per satu secara terisolasi. Jalan dan kanal baru dapat mengubah hidrologi, akses, pola permukiman, serta potensi penyalaan di area yang lebih luas. Kajian lingkungan dan tata ruang sebaiknya mengukur perubahan risiko pada skala kesatuan hidrologis dan bentang ekologi. Jika ambang risiko terlampaui, pilihan yang tersedia mencakup perubahan desain, larangan kegiatan tertentu, perlindungan zona inti, atau kewajiban pemulihan. Proses ini lebih baik daripada membiarkan risiko bertambah sampai biaya respons menjadi jauh lebih besar.

Pengadaan publik juga dapat digunakan untuk mendukung praktik yang lebih aman. Pemerintah dapat mensyaratkan pengelolaan tanpa bakar, pelacakan bahan baku, dan perlindungan gambut dalam kontrak yang relevan, disertai verifikasi yang sepadan. Persyaratan harus realistis bagi usaha kecil dan memberi dukungan transisi, bukan membuat mereka kehilangan pasar karena administrasi. Kerangka hukum yang baik tidak hanya menetapkan larangan; ia juga membangun cara yang layak bagi masyarakat dan organisasi untuk memenuhi kewajiban.

28. Ekonomi risiko dan alasan investasi pencegahan

Dalam penganggaran publik, pengeluaran untuk pencegahan sering kalah bersaing dengan kebutuhan yang terlihat segera. Api yang berhasil dipadamkan mudah dihitung, sementara kerugian yang tidak terjadi lebih sulit diamati. Analisis ekonomi dapat membuat manfaat pencegahan lebih terlihat dengan menghitung biaya kesehatan, kehilangan hasil pertanian, kerusakan ekosistem, gangguan pendidikan, emisi, gangguan transportasi, serta biaya pemadaman. Perhitungan harus menjelaskan metode dan tidak mengubah nilai moneter menjadi satu-satunya ukuran, sebab kehilangan habitat atau budaya tidak selalu dapat diganti dengan uang.

Kiely et al. (2021) memperkirakan bahwa kebakaran tahun 2015 menimbulkan kerugian ekonomi sangat besar ketika kerusakan tutupan lahan, karbon, dan dampak kesehatan jangka panjang dimasukkan. Penulis juga membandingkan skenario restorasi gambut dan menunjukkan potensi pengurangan kerugian. Angka tersebut merupakan estimasi model, bukan audit keuangan aktual yang menghitung setiap transaksi. Nilai utamanya bagi kebijakan adalah mengungkap bahwa biaya sosial kebakaran dapat jauh melampaui penghematan privat dari pembukaan lahan menggunakan api. Analisis serupa dapat diperbarui untuk wilayah dan episode terbaru dengan data lokal yang lebih baik.

Analisis biaya-manfaat perlu menangkap distribusi, bukan hanya jumlah total. Bila manfaat investasi restorasi dinikmati masyarakat luas dan negara tetangga, sementara biaya awal jatuh pada pemilik lahan atau pemerintah kabupaten, maka dibutuhkan mekanisme pembagian biaya yang adil. Pendanaan dapat menggabungkan APBN, APBD, kontribusi perusahaan, dana iklim, dan kemitraan internasional sesuai aturan. Pembayaran berbasis hasil harus menghindari insentif untuk membiarkan degradasi dahulu agar kemudian memperoleh dana pemulihan. Baseline dan bukti tambahan harus ditetapkan secara independen.

Investasi juga dapat diarahkan pada infrastruktur pencegahan yang memberi manfaat ganda. Pengelolaan air gambut dapat mengurangi risiko api sekaligus menjaga sumber air. Sistem sensor dapat memperbaiki peringatan dan data kualitas udara. Pelatihan desa dapat meningkatkan keterampilan pemadaman sekaligus memperkuat organisasi lokal. Namun, manfaat ganda perlu diverifikasi. Struktur air yang tidak terawat tidak memberikan manfaat; sensor yang tidak dikalibrasi dapat menyesatkan; dan pelatihan tanpa alat atau kewenangan tidak otomatis meningkatkan kapasitas.

Rencana pembiayaan sebaiknya mempertimbangkan biaya siklus hidup. Untuk setiap alat atau infrastruktur, anggaran perlu mencakup pengadaan, operasi, pemeliharaan, penggantian, penyimpanan, serta pelatihan. Pembangunan sekat kanal tanpa pembiayaan perawatan adalah investasi yang nilainya menurun cepat. Pengadaan masker tanpa kebijakan distribusi dan panduan penggunaan juga menghasilkan perlindungan yang tidak merata. Analisis biaya siklus hidup membantu pemerintah membandingkan investasi pencegahan dengan biaya darurat yang berulang.

Transparansi anggaran memperkuat kepercayaan. Publik dapat mengetahui berapa dana yang dialokasikan bagi patroli, pemantauan udara, pencegahan desa, pemulihan, dan layanan kesehatan. Pelaporan perlu menunjukkan belanja, keluaran, hasil, dan penerima manfaat. Audit sosial dapat membantu mendeteksi apakah alat tersedia, apakah pelatihan dilakukan, dan apakah

sumber daya mencapai lokasi prioritas. Pembiayaan yang terbuka memudahkan pemerintah memperbaiki alokasi dari tahun ke tahun.

29. Pemantauan PM2.5 dan komunikasi risiko kesehatan

Pemantauan PM2.5 untuk kebakaran membutuhkan gabungan jaringan stasiun rujukan, sensor lokal, data satelit, model atmosfer, dan informasi warga. Stasiun rujukan memberi data berkualitas tinggi pada lokasi terbatas; sensor berbiaya rendah memperluas cakupan dan membantu mengenali variasi lingkungan; satelit membantu mengidentifikasi pola plume; model mengisi celah ruang dan waktu. Tidak satu pun sumber menggantikan yang lain. Dashboard harus menunjukkan asal data, jam pengukuran, status kalibrasi, cakupan lokasi, dan tingkat keyakinan.

Penempatan monitor perlu mempertimbangkan wilayah sumber, permukiman, sekolah, rumah sakit, puskesmas, tempat kerja luar ruang, serta area hilir yang menerima asap. Jaringan yang hanya berada di pusat kota dapat gagal menangkap paparan di desa, perkebunan, atau wilayah gambut. Pemerintah daerah, universitas, dan komunitas dapat mengidentifikasi lokasi prioritas, tetapi standar pemasangan dan pemeliharaan harus jelas agar hasil dapat ditafsirkan bersama.

Sensor PM2.5 optik memberi hasil cepat dan berguna untuk tren, tetapi pembacaannya dapat dipengaruhi kelembapan dan karakter partikel. Kalibrasi kolokasi dengan monitor rujukan, koreksi yang terdokumentasi, perlindungan cuaca, dan pemeriksaan berkala meningkatkan keterandalan. Data dari perangkat berbeda sebaiknya tidak digabung begitu saja tanpa memahami model, firmware, dan algoritma. Peta real-time perlu menandai ketika data tidak tersedia atau kualitasnya rendah.

Satelit dapat membantu melacak hotspot, aerosol, dan transportasi asap, tetapi pengamatan jarang waktu atau terhalang awan dapat melewatkan kejadian tertentu. Deteksi titik api bukan pengukuran langsung konsentrasi di permukaan atau dosis yang dihirup warga. Model kimia atmosfer dapat

menghubungkan sumber dan konsentrasi, namun bergantung pada estimasi emisi, meteorologi, dan validasi lokal. Komunikasi publik perlu menyebut prakiraan sebagai prakiraan dan pengukuran sebagai data yang telah diamati.

AI dan pembelajaran mesin dapat mendukung prakiraan PM2.5 dengan menggabungkan cuaca, data satelit, sensor, sejarah kebakaran, dan karakter lanskap. Nilai praktis model terletak pada kemampuan memberi peringatan awal dan mengarahkan pemeriksaan, bukan memberikan kepastian individual. Model harus diuji di musim dan provinsi yang berbeda, dipantau biasnya, dan menyatakan keterbatasan jika data pelatihan tidak mencakup gambut atau permukiman tertentu. Keputusan evakuasi, layanan, atau pembatasan tidak seharusnya bertumpu pada skor algoritma tanpa penilaian manusia dan dasar yang dapat dijelaskan.

Peringatan kualitas udara harus mengubah angka menjadi tindakan. Pesan perlu menyebut wilayah dan waktu, apakah data diukur atau diprakirakan, siapa yang perlu memberi perhatian khusus, kegiatan yang sebaiknya disesuaikan, alternatif ruang lebih bersih, dan cara memperoleh pertolongan. Jika indeks lokal digunakan, sumber dan skala kategorinya harus jelas. Angka konsentrasi tanpa konteks dapat membuat warga cemas atau justru menormalisasi paparan yang berulang.

Saluran komunikasi perlu mencakup aplikasi dan situs, pesan singkat, radio lokal, pengeras suara desa, fasilitas kesehatan, sekolah, tempat kerja, dan jaringan kader. Format harus dapat diakses penyandang disabilitas dan tersedia dalam bahasa yang digunakan warga. Informasi yang konsisten dari dinas kesehatan, lingkungan, BMKG, sekolah, dan pemerintah daerah memperkuat kepercayaan. Koreksi data dan penjelasan perbedaan angka perlu disampaikan terbuka, bukan disembunyikan.

Teknologi pemantauan bernilai ketika terhubung dengan protokol tindakan dan sumber daya. Ambang tertentu dapat memicu pemeriksaan fasilitas, peningkatan komunikasi, perubahan kegiatan sekolah, perlindungan pekerja, atau kesiapan klinik; ambang tersebut harus ditetapkan oleh otoritas sesuai

standar dan kondisi setempat. Data sebaiknya dievaluasi setelah musim asap: lokasi mana yang tidak terpantau, prakiraan mana yang meleset, dan apakah peringatan diterima kelompok yang dituju.

30. Rancangan penelitian dan evaluasi dampak

Penelitian karhutla perlu menggabungkan beberapa unit analisis. Unit ekologi mengukur perubahan tutupan, kelembapan, kedalaman terbakar, dan biodiversitas. Unit kesehatan mengukur paparan, gejala, penggunaan layanan, serta perbedaan risiko antar kelompok. Unit organisasi menganalisis koordinasi, kapasitas, keputusan, dan akuntabilitas. Unit rumah tangga mengkaji pendapatan, penggunaan api, biaya adaptasi, serta perubahan mata pencaharian. Unit kebijakan meneliti bagaimana izin, anggaran, penegakan, dan pasar membentuk pilihan. Penggabungan unit memungkinkan hubungan antara akar penyebab dan dampak akhir dipahami secara lebih utuh.

Metode kuantitatif dapat menguji hubungan antara curah hujan, kelembapan gambut, akses jalan, penggunaan lahan, dan frekuensi api. Panel desa atau kabupaten dapat membantu membedakan kondisi tetap dari perubahan dari waktu ke waktu. Namun, korelasi spasial tidak otomatis menunjukkan sumber penyalaan atau pelaku. Analisis kausal memerlukan strategi identifikasi, asumsi yang dinyatakan, pemeriksaan faktor pengganggu, serta uji ketahanan. Hasil model harus dijelaskan dalam bahasa yang dapat dipahami pembuat kebijakan dan masyarakat.

Metode kualitatif seperti wawancara, observasi, sejarah lisan, dan analisis proses dapat menyingkap alasan warga atau organisasi menggunakan api, hambatan praktik alternatif, dan bagaimana keputusan darurat dibuat. Peneliti perlu menjaga kerahasiaan informan, memperoleh persetujuan, dan tidak menempatkan peserta dalam risiko hukum atau sosial. Temuan kualitatif tidak bertujuan menghitung prevalensi seluruh populasi, tetapi menjelaskan mekanisme dan makna yang sulit ditangkap oleh data satelit. Triangulasi dengan peta, dokumen, dan data cuaca meningkatkan kredibilitas.

Evaluasi program dapat menggunakan desain sebelum-sesudah dengan kelompok pembanding, pencocokan lokasi, atau pendekatan kuasi-eksperimental. Pemilihan metode bergantung pada kapan intervensi dimulai, ketersediaan baseline, dan kemungkinan lokasi pembanding terkena dampak limpahan. Intervensi pembasahan gambut, misalnya, perlu diukur melalui perubahan muka air, api, emisi, kualitas udara, dan mata pencaharian. Evaluasi satu tahun mungkin terlalu singkat untuk menangkap ketahanan hidrologis atau perubahan perilaku. Data beberapa musim kering memberikan gambaran yang lebih kuat.

Riset harus mempublikasikan protokol, definisi variabel, dan keterbatasan. Data yang digunakan untuk mengestimasi dampak kesehatan perlu menjelaskan resolusi waktu dan ruang, sumber polusi lain, serta pemodelan paparan. Studi yang melaporkan mortalitas perlu membedakan jumlah kematian yang diamati dari kematian berlebih yang diestimasi. Penyampaian ketidakpastian tidak mengurangi kegunaan penelitian; justru membantu pembuat keputusan memahami rentang hasil yang masuk akal dan tindakan yang tetap bermanfaat dalam berbagai skenario.

Agenda penelitian masa depan mencakup pemantauan jangka panjang anak dan ibu hamil, studi kualitas udara di desa dekat sumber api, perbandingan model restorasi, evaluasi kesejahteraan setelah kebakaran, pengaruh tata kelola tenurial, dan efektivitas pendanaan berbasis hasil. Kemitraan universitas dengan pemerintah daerah dapat membangun laboratorium lapangan yang mengintegrasikan sensor, data administrasi, dan pengetahuan masyarakat. Hasil riset sebaiknya disampaikan dalam artikel ilmiah sekaligus ringkasan operasional, peta, dan materi pendidikan yang dapat dipakai langsung.

31. Kepemimpinan dan manajemen organisasi dalam krisis

Karhutla menguji kemampuan organisasi untuk bekerja lintas batas sektoral. Pemimpin perlu mengelola informasi yang tidak lengkap, ketidakpastian cuaca, konflik kepentingan, keterbatasan sumber daya, dan tekanan publik.

Keputusan yang baik tidak selalu berarti mengetahui seluruh fakta, melainkan mengidentifikasi risiko paling besar, bertindak secara proporsional, mendokumentasikan alasan, dan memperbarui keputusan ketika bukti berubah. Struktur komando yang jelas membantu mengurangi duplikasi dan perintah yang saling bertentangan.

Organisasi perlu membangun budaya pelaporan dini. Petugas dan warga yang melaporkan asap, kebakaran kecil, atau sekat kanal yang rusak harus mendapat respons, bukan disalahkan karena membawa kabar buruk. Jika laporan awal diabaikan, api dapat berkembang dan kepercayaan menurun. Sistem pembelajaran tanpa menyalahkan membedakan kesalahan yang dapat diperbaiki dari pelanggaran yang disengaja. Catatan insiden, termasuk kejadian nyaris celaka, dapat memperbaiki prosedur keselamatan dan alokasi alat.

Komunikasi internal memerlukan gambaran situasi bersama. Peta operasi, pembaruan cuaca, lokasi tim, sumber air, zona berbahaya, rumah sakit, dan jalur evakuasi harus tersedia bagi pihak yang memerlukan. Ketika koneksi digital terputus, prosedur cadangan melalui radio dan peta cetak menjadi penting. Organisasi perlu menunjuk juru bicara dan kanal informasi agar pesan tidak berbeda-beda. Pembaruan rutin membatasi ruang bagi rumor dan memudahkan pimpinan menjelaskan perubahan strategi.

Manajemen relawan memerlukan rekrutmen, pelatihan, perlengkapan, penugasan, dan pengakhiran operasi yang tertib. Semangat membantu tidak menghapus risiko. Relawan yang tidak memahami api gambut atau kondisi angin dapat membahayakan dirinya dan tim lain. Organisasi lokal dapat mengembangkan modul keselamatan yang sesuai dengan jenis kebakaran setempat, menyediakan pengawasan, dan menetapkan tugas yang dapat dilakukan relawan tanpa memasuki zona berbahaya. Data jam kerja, paparan, luka, dan kebutuhan pemulihan harus dicatat.

Kepemimpinan kolaboratif memberi ruang kepada pemerintah, masyarakat, perusahaan, universitas, dan organisasi sipil untuk berbagi informasi sambil

menjaga akuntabilitas. Kolaborasi bukan berarti menyamakan tanggung jawab semua pihak. Pemilik izin memiliki kewajiban tertentu; pemerintah menjalankan fungsi pengaturan dan pengawasan; masyarakat memiliki pengetahuan dan hak; peneliti menyediakan bukti; dan lembaga kesehatan melindungi warga. Peran yang eksplisit membantu menghindari situasi ketika semua pihak hadir tetapi tidak ada yang bertanggung jawab atas tindak lanjut.

Setelah krisis, pimpinan perlu menerjemahkan pembelajaran menjadi agenda organisasi dengan pemilik, anggaran, dan tenggat. Rapat evaluasi tanpa daftar tindakan mudah menjadi ritual. Setiap rekomendasi perlu ditandai statusnya, hambatannya, dan keputusan yang diperlukan. Pimpinan daerah dapat meninjau kemajuan setiap triwulan sebelum musim kemarau berikutnya. Dengan demikian, manajemen krisis tidak berakhir ketika api padam, tetapi menjadi siklus perbaikan kapasitas organisasi.

32. Pembelajaran lintas episode kebakaran besar

Perbandingan episode 1997–1998, 2015, 2019, dan 2026 perlu dilakukan dengan metodologi yang konsisten. Setiap episode memiliki kondisi iklim, tata guna lahan, instrumen pemantauan, kepadatan penduduk, dan respons kebijakan berbeda. Membandingkan total luas terbakar tanpa menyesuaikan definisi, cakupan, serta periode observasi dapat menghasilkan kesimpulan yang keliru. Peneliti perlu membedakan luas permukaan yang terdeteksi, wilayah yang terpapar asap, luas gambut terdampak, dan luas konsesi yang memiliki indikasi kejadian. Penyajian rentang dengan sumber dan tanggal akan lebih jujur daripada menyajikan satu angka seolah-olah tidak memiliki ketidakpastian.

Kebakaran 1997–1998 memperlihatkan skala emisi dan kerusakan yang dapat terjadi ketika kekeringan dan penggunaan api bertemu pada lanskap yang berubah. Kebakaran 2015 memicu pembentukan kebijakan restorasi dan penguatan lembaga khusus gambut. Tahun 2019 menunjukkan bahwa kejadian besar kembali dapat berlangsung meskipun telah ada pengalaman

sebelumnya dan beberapa perubahan kelembagaan. Situasi 2026, berdasarkan laporan yang tersedia sampai 16 Oktober, kembali memperlihatkan tekanan pada kesehatan, layanan publik, koordinasi bantuan, dan lanskap gambut. Pola berulang ini menunjukkan bahwa penguatan kapasitas darurat saja belum cukup untuk memutus sebab struktural.

Setiap krisis menghasilkan keputusan dan kebijakan, tetapi daya tahannya bergantung pada kesinambungan politik serta pendanaan. Lembaga dapat berganti nama, mandat, atau struktur; yang penting adalah fungsi perlindungan lanskap dan masyarakat tetap berjalan. Metrik kemajuan seharusnya mengikuti fungsi tersebut dari satu periode pemerintahan ke periode berikutnya. Jika data muka air, patroli, dan kondisi sensor tidak diteruskan ketika program berubah, pembelajaran hilang. Karena itu, arsip kebijakan, peta, data, serta laporan evaluasi perlu disimpan dalam sistem yang dapat diakses oleh pejabat dan peneliti yang datang kemudian.

Perbandingan historis juga membantu mengidentifikasi kombinasi pemicu dan kerentanan. Bila kekeringan dengan indeks yang mirip menghasilkan dampak berbeda, perbedaan itu dapat menunjukkan pengaruh tata air, perubahan tutupan, kesiapsiagaan, atau efektivitas respons. Bila luas terbakar menurun tetapi paparan PM2.5 tetap tinggi, hal tersebut mungkin terkait dengan kedalaman api, bahan bakar gambut, lokasi dekat penduduk, dan pola angin. Analisis semacam ini menghindari kesimpulan sederhana yang hanya melihat satu indikator.

Pembelajaran lintas episode harus diakhiri dengan daftar perubahan yang dapat diaudit: kebijakan apa yang diubah, anggaran apa yang disediakan, wilayah mana yang diprioritaskan, siapa penanggung jawab, dan kapan hasilnya diperiksa. Pemerintah dapat membandingkan komitmen sebelum dan sesudah musim api, lalu mengundang lembaga independen untuk memeriksa kemajuannya. Penilaian publik yang teratur mengubah krisis dari peristiwa yang dilupakan menjadi sumber pembelajaran kelembagaan.

33. Jalur paparan dan pengurangan dosis PM2.5 yang terhirup

Mengurangi dosis PM2.5 yang terhirup membutuhkan tindakan pada beberapa lapisan. Pencegahan kebakaran menurunkan emisi; pemantauan memperlihatkan kapan dan di mana udara memburuk; pengaturan aktivitas membatasi dosis saat konsentrasi tinggi; ruang dengan filtrasi membantu mengurangi paparan dalam ruang; perlindungan kerja dan layanan kesehatan menangani kebutuhan khusus. Tidak ada satu tindakan personal yang dapat menggantikan pengendalian sumber atau menyelesaikan seluruh risiko.

Informasi kualitas udara perlu lokal, diperbarui, dan mudah diterjemahkan ke keputusan. Warga perlu mengetahui apakah angka berasal dari monitor atau model, wilayah yang diwakili, durasi rata-rata, dan kapan pembaruan berikutnya. Pesan “hindari aktivitas berat di luar” lebih operasional bila menjelaskan pilihan aktivitas dalam ruang, kebutuhan anak dan pekerja, lokasi fasilitas yang lebih bersih, serta cara memperoleh bantuan. Informasi tidak boleh menyiratkan bahwa kelompok berisiko harus menanggung sendiri paparan yang bersumber dari tata kelola lanskap.

Mengurangi waktu di luar ketika asap pekat dan menghindari aktivitas fisik berat dapat menurunkan jumlah udara tercemar yang terhirup. Besarnya manfaat bergantung pada kondisi udara di dalam ruang, suhu, ventilasi, dan sumber polusi domestik. Menutup pintu dan jendela dapat membantu saat udara luar buruk, tetapi ruang yang menjadi terlalu panas atau tidak aman dapat menimbulkan risiko. Keluarga perlu pilihan ruang bersih dan pendinginan yang sesuai, terutama di iklim tropis.

Filtrasi udara dapat mengurangi partikel dalam ruang bila alat memiliki kapasitas sesuai volume ruang, filter yang tepat, aliran udara memadai, dan pemeliharaan. Pembersih dengan filter partikulat efisiensi tinggi atau sistem filtrasi bangunan dapat dipilih berdasarkan spesifikasi, bukan klaim pemasaran saja. Efektivitas turun bila alat terlalu kecil, filter kotor, aliran tertutup, atau pintu-jendela sering dibuka. Penggunaan filter tidak menghilangkan semua gas dan tidak mencegah asap di luar ruang.

Respirator partikulat yang tersertifikasi dan pas di wajah dapat mengurangi penghirupan partikel ketika seseorang harus berada di luar, tetapi tidak menyaring semua komponen gas dan dapat tidak nyaman. Kesesuaian, usia, kondisi kesehatan, pekerjaan, panas, dan kemampuan memakai respirator perlu diperhatikan. Masker kain atau masker bedah tidak dirancang untuk memberi perlindungan yang setara terhadap PM2.5. Komunikasi harus menerangkan keterbatasan dengan jelas dan mendorong penyediaan perlindungan yang layak bagi pekerja.

Pekerjaan dan perjalanan memengaruhi dosis. Kegiatan berat dapat dipindah ke jam lain atau ruang dalam jika aman; pemberi kerja dapat mengubah jadwal, menyediakan area istirahat lebih bersih, mengurangi paparan, serta memberikan alat pelindung yang sesuai. Warga yang perlu ke fasilitas kesehatan memerlukan transportasi yang tidak memaksa mereka berjalan jauh di udara tercemar. Perlindungan yang mengurangi upah atau menunda perawatan dapat memperbesar risiko sosial dan klinis.

Rumah tanpa pendingin, hunian padat, dan sumber pembakaran dalam ruang memerlukan solusi yang berbeda. Ruang udara bersih komunitas dapat memberi pilihan saat hunian tidak mampu menahan asap, asalkan dapat dicapai, memiliki filtrasi dan pengelolaan suhu, serta menerima warga dengan disabilitas atau kebutuhan medis. Pemantauan PM2.5 dalam dan luar ruang dapat membantu petugas menilai apakah strategi yang digunakan benar-benar menurunkan konsentrasi di ruang perlindungan.

Pengurangan paparan tidak seharusnya menjadi perlombaan mencari perangkat paling mahal. Prioritas kesehatan masyarakat ialah mencegah kebakaran, memperbaiki data dan peringatan, memastikan fasilitas publik berfungsi, dan memberi dukungan pada kelompok yang memiliki pilihan paling sedikit. Alat rumah tangga dapat menjadi pelengkap dengan manfaat yang bergantung pada kondisi penggunaan. Program subsidi dan pengadaan publik perlu menilai biaya sepanjang umur, akses suku cadang, konsumsi listrik, keamanan, dan hasil pengukuran.

34. Perlindungan anak, sekolah, dan pengasuhan

Sekolah di wilayah rawan perlu mempunyai rencana operasional yang mengatur kapan kegiatan olahraga dibatasi, kapan jendela ditutup, kapan pembelajaran dipindahkan, serta kapan sekolah ditutup sementara. Keputusan harus mengacu pada data kualitas udara yang tersedia dan panduan kesehatan, dengan fleksibilitas bagi kondisi lokal. Sekolah tidak seharusnya menunggu instruksi administratif bila kondisi di ruang kelas sudah membahayakan. Pada saat yang sama, keputusan penutupan perlu disertai rencana agar anak tidak kehilangan pembelajaran secara berkepanjangan.

Pembelajaran jarak jauh dapat menjadi alternatif, tetapi tidak semua keluarga memiliki internet, perangkat, ruang belajar, atau pendamping. Sekolah dapat menyiapkan lembar belajar cetak, pengumpulan tugas fleksibel, siaran radio atau pesan singkat, dan jadwal konsultasi yang tidak mensyaratkan koneksi terus-menerus. Dukungan perlu diberikan kepada anak yang mengalami gangguan kesehatan atau kehilangan tempat tinggal. Guru harus memperoleh panduan untuk mengatur beban belajar selama situasi darurat, bukan sekadar memindahkan seluruh kegiatan kelas ke layar.

Kualitas udara di dalam ruang sekolah perlu diperhatikan. Ruangan yang tertutup dapat mengurangi masuknya asap pada kondisi tertentu, tetapi ventilasi yang tidak dirancang baik dapat menyebabkan panas, kelembapan, dan penumpukan polutan dari dalam. Sekolah perlu memiliki protokol ventilasi dan pembersihan yang aman, memperhatikan filter bila tersedia, serta menetapkan ruang yang lebih terlindungi untuk siswa dengan penyakit pernapasan. Pemeriksaan kesehatan dan komunikasi dengan orang tua membantu mengidentifikasi gejala yang memerlukan perhatian.

Pendidikan kebencanaan dapat memperkuat literasi lingkungan sebelum krisis. Siswa dapat mempelajari perbedaan hotspot dan api terverifikasi, hubungan gambut dengan air, dampak asap, cara mengakses informasi resmi, serta tindakan aman ketika melihat kebakaran. Materi tidak perlu menakut-nakuti atau menyalahkan kelompok tertentu. Pembelajaran berbasis proyek dapat

melibatkan pemetaan sumber air, pengamatan vegetasi, wawancara sejarah lokal, dan kampanye perlindungan kesehatan. Kegiatan lapangan harus memperhatikan keselamatan dan tidak membawa siswa ke lokasi api.

Setelah asap menghilang, sekolah perlu membantu pemulihan belajar dan kesejahteraan. Penilaian diagnostik dapat mengidentifikasi materi yang tertinggal tanpa memberi stigma kepada siswa. Konselor atau guru bimbingan dapat membantu anak yang mengalami kecemasan atau kehilangan anggota keluarga, rumah, maupun penghidupan. Pengalaman sekolah pada suatu musim dapat dicatat dan digunakan untuk memperbaiki protokol. Dengan demikian, pendidikan berperan sekaligus sebagai layanan yang perlu dilindungi dan sebagai sarana membangun kesiapsiagaan generasi berikutnya.

35. Kesiapsiagaan rumah tangga bagi lansia dan ibu hamil

Rumah tangga sebaiknya memiliki rencana sederhana sebelum musim kering: cara menerima peringatan, siapa yang memeriksa kualitas udara, lokasi ruang lebih bersih, daftar obat dan kontak klinik, kebutuhan transportasi, serta orang yang dapat membantu bila anggota keluarga kesulitan bergerak. Rencana perlu disesuaikan dengan rumah nyata, bukan mengasumsikan bahwa semua keluarga memiliki pendingin, generator, kendaraan, dan internet.

Untuk lansia, keluarga dan tetangga dapat menyusun daftar kebutuhan yang tidak boleh terputus, seperti obat rutin, alat bantu, oksigen sesuai resep, alat komunikasi, makanan, dan kontak pendamping. Bila lansia menggunakan alat medis bertenaga listrik, rencana cadangan perlu dibicarakan dengan tenaga kesehatan dan penyedia layanan. Periksa apakah informasi disampaikan dalam format yang dapat didengar atau dibaca, dan jangan mengandalkan aplikasi telepon saja. Lansia sendiri perlu dilibatkan dalam penetapan pilihan, terutama tentang kapan akan pindah ke ruang perlindungan dan siapa yang mendampingi.

Ibu hamil dapat mendiskusikan rencana musim asap dengan bidan atau dokter yang menangani kehamilan, termasuk cara menghubungi fasilitas bila jadwal atau akses transportasi berubah. Rencana dapat menyertakan dokumen pemeriksaan, nomor layanan, dukungan perjalanan, dan kebutuhan persalinan darurat. Tujuannya bukan memberi diagnosis atau mengganti perawatan antenatal, melainkan memastikan kesinambungan layanan dan mengurangi hambatan bila polusi meningkat. Keluarga perlu memperoleh pesan yang tenang dan jelas agar perlindungan tidak berubah menjadi kecemasan atau pembatasan yang tidak perlu.

Dalam episode asap, keluarga dapat memantau informasi setempat, menyesuaikan aktivitas luar ruang, dan mencari pertolongan saat gejala baru atau memburuk. Gejala seperti kesulitan bernapas berat, nyeri dada, pingsan, kebingungan akut, atau keadaan darurat kehamilan memerlukan penilaian segera menurut jalur layanan setempat. Daftar gejala darurat harus disusun dan disebarluaskan oleh otoritas kesehatan, dengan bahasa dan nomor telepon yang berlaku di wilayah tersebut. Artikel ini tidak menggantikan nasihat klinis untuk pasien individual.

Ruang perlindungan rumah dapat menjadi satu kamar yang lebih mudah dijaga kebersihannya, jauh dari sumber asap dalam ruang, dan memungkinkan pendinginan serta istirahat. Filter perlu sesuai ukuran ruang dan dirawat; penggunaan alat tidak boleh menciptakan risiko kebakaran, sengatan listrik, atau kualitas udara yang lebih buruk. Bila kondisi rumah tidak memungkinkan, keluarga harus tahu lokasi ruang udara bersih umum, jam akses, transportasi, dan dukungan bagi penghuni dengan kursi roda, anak kecil, atau kebutuhan medis.

Keluarga perlu menyeimbangkan perlindungan dari asap dengan bahaya lain. Menutup rapat rumah tanpa pendinginan dalam suhu panas ekstrem dapat membahayakan lansia dan ibu hamil. Evakuasi pun dapat menambah kelelahan atau mengganggu pelayanan bila dilakukan tanpa perencanaan. Keputusan harus mempertimbangkan instruksi otoritas setempat, konsentrasi

polutan, suhu, kemampuan bangunan, kondisi kesehatan, dan ketersediaan tempat yang lebih aman. Bantuan publik menjadi penting ketika keluarga tidak memiliki pilihan yang aman.

Setelah kualitas udara membaik, keluarga dapat memastikan obat dan layanan kembali tersedia, menghubungi tenaga kesehatan jika keluhan menetap, dan mengevaluasi apa yang berjalan atau gagal. Catatan sederhana tentang lokasi, waktu, gejala, kunjungan, serta kegiatan yang terdampak dapat membantu konsultasi dan pembelajaran komunitas, tanpa menganggap catatan itu sebagai diagnosis atau bukti sebab-akibat. Persiapan yang berulang dan dapat dipahami mengurangi kepanikan dan meningkatkan rasa kendali.

36. Perlindungan pekerja dan petugas lapangan

Petugas pemadam menghadapi gabungan bahaya: panas, asap, visibilitas rendah, permukaan tanah tidak stabil, pohon tumbang, peralatan berat, kelelahan, dan perubahan cuaca yang cepat. Api gambut memiliki risiko tersendiri karena tanah dapat tampak padat tetapi menyimpan rongga terbakar, sehingga petugas dapat terperosok atau mengalami luka. Penilaian risiko harus dilakukan sebelum penugasan dan diperbarui selama operasi. Komandan perlu memiliki kewenangan nyata untuk menarik tim bila kondisi berubah.

Sistem manajemen keselamatan sebaiknya mencakup pelatihan sesuai tipe kebakaran, alat pelindung yang layak, pemeriksaan medis, hidrasi, rotasi kerja, komunikasi, pencatatan posisi, serta jalur evakuasi. Peralatan tidak cukup hanya tersedia di gudang; ia perlu diperiksa, diuji, dan digunakan oleh personel yang terlatih. Petugas baru atau relawan harus bekerja di bawah pengawasan. Kelelahan meningkatkan kemungkinan kesalahan, sehingga batas jam kerja dan periode istirahat harus diterapkan meskipun operasi sedang mendapat tekanan publik.

Insiden keselamatan perlu dianalisis untuk mencari penyebab sistemik. Jika alat rusak, perlu ditelusuri apakah pengadaan, penyimpanan, atau pemeliharaan bermasalah. Jika komunikasi terputus, organisasi perlu memeriksa jaringan, protokol cadangan, dan disiplin radio. Jika personel masuk ke zona berbahaya tanpa informasi cukup, komando perlu menilai kualitas briefing dan pembagian peran. Pelaporan kejadian nyaris celaka membantu mencegah korban berikutnya dan tidak seharusnya dihambat oleh budaya menyalahkan.

Penggunaan relawan harus memenuhi prinsip perlindungan dan martabat. Warga yang membantu tidak boleh dipaksa mengambil risiko karena tidak ada tim profesional. Mereka perlu menerima informasi bahaya, pelatihan, alat, jaminan atau perlindungan sesuai kebijakan, dan penugasan yang sesuai kemampuan. Pengakuan publik penting, tetapi tidak menggantikan keselamatan dan dukungan pascaoperasi. Keluarga petugas yang terluka atau meninggal memerlukan layanan yang cepat serta proses pertanggungjawaban yang transparan.

Operasi pemadaman juga harus melindungi masyarakat di sekitar lokasi. Evakuasi perlu mempertimbangkan lansia, anak, pasien, ternak, akses transportasi, tempat tinggal sementara, dan informasi yang mudah dipahami. Petugas harus menjelaskan batas bahaya dan kapan warga dapat kembali. Penggunaan jalan dan sumber air untuk operasi tidak boleh memutus akses warga tanpa alternatif. Hubungan yang terbuka antara komandan dan masyarakat meningkatkan kepatuhan serta membantu petugas mendapatkan informasi lokal.

37. Komunikasi risiko yang inklusif dan dapat ditindaklanjuti

Dalam krisis asap, informasi menyebar melalui media tradisional, pesan singkat, media sosial, dan percakapan komunitas. Kecepatan informasi membantu warga bertindak, tetapi rumor mengenai penyebab, kesehatan, bantuan, dan angka kebakaran dapat menciptakan kebingungan. Pemerintah perlu menyediakan sumber data yang mudah dibagikan, format pesan singkat,

dan pembaruan terjadwal. Informasi yang terlambat sering memberi ruang kepada spekulasi dan melemahkan kepercayaan.

Pesan publik sebaiknya memisahkan tiga status informasi: fakta yang terverifikasi, perkiraan sementara, dan hipotesis yang sedang diperiksa. Ketika angka berubah karena pembaruan data, lembaga menjelaskan alasannya, misalnya karena luas peta telah direvisi atau periode penghitungan bertambah. Jika terdapat perbedaan angka antarinstansi, publik memerlukan penjelasan tentang definisi dan sumber masing-masing, bukan sekadar memilih angka yang paling besar atau paling kecil.

Komunikasi risiko kesehatan harus menyebut tindakan berdasarkan kondisi dan kelompok. Pesan seperti "jaga kesehatan" terlalu umum. Pesan yang lebih berguna menjelaskan kapan aktivitas luar ruang perlu dibatasi, gejala apa yang harus diperhatikan, di mana ruang bersih tersedia, dan bagaimana mengakses pertolongan. Materi perlu diterjemahkan ke bahasa lokal, menggunakan gambar bagi pembaca dengan literasi terbatas, serta disampaikan lewat kanal yang benar-benar digunakan masyarakat.

Media dapat membantu menjelaskan hubungan antara sumber api, gambut, angin, kualitas udara, dan kesehatan tanpa menyederhanakan penyebab. Pelatihan jurnalis lingkungan dan akses terhadap pakar lokal dapat meningkatkan mutu liputan. Foto lokasi dan peta harus diberi tanggal, konteks, serta verifikasi agar tidak digunakan ulang sebagai bukti kejadian baru. Organisasi pemerintah dan masyarakat sipil perlu menanggapi informasi salah dengan bukti serta bahasa yang tidak merendahkan warga.

Kepercayaan publik dibangun melalui konsistensi antara ucapan dan tindakan. Jika pemerintah mengimbau warga melindungi kesehatan tetapi sekolah tidak memiliki protokol dan puskesmas kekurangan obat, pesan menjadi tidak meyakinkan. Jika transparansi dijanjikan tetapi data perizinan dan penegakan tidak tersedia, kampanye pencegahan dipandang sebagai komunikasi sepihak. Karena itu, komunikasi publik harus menjadi bagian dari akuntabilitas:

menjelaskan apa yang dilakukan, apa yang belum dilakukan, dan kapan masyarakat dapat menilai hasilnya.

38. Pemulihan kesehatan dan dukungan bagi keluarga

Pemulihan setelah kebakaran memerlukan asesmen kebutuhan yang dilakukan bersama warga. Kerugian dapat berupa rumah, tanaman, peralatan, kesehatan, pendapatan, dokumen, akses air, dan kesempatan belajar. Bantuan yang hanya didasarkan pada nilai aset dapat mengabaikan keluarga yang kehilangan sumber nafkah tetapi rumahnya tidak terbakar. Tim pemulihan perlu menggunakan kriteria terbuka dan memberi jalur pengaduan bagi warga yang tidak tercatat.

Perlindungan sosial sementara dapat mencegah rumah tangga mengambil keputusan yang meningkatkan risiko. Bantuan tunai, akses pangan, pemulihan alat kerja, dukungan kesehatan, dan program kerja lokal dapat menjaga penghasilan selama kebun atau usaha pulih. Bantuan harus disalurkan cepat dan tidak mensyaratkan dokumen yang hilang akibat bencana. Pada saat yang sama, program perlu menjaga integritas data dan memastikan bantuan tidak hanya sampai kepada kelompok yang memiliki hubungan administratif kuat.

Pemulihan harus mempertimbangkan perbedaan dampak menurut gender, usia, disabilitas, status lahan, dan pekerjaan. Perempuan sering memikul beban perawatan saat anggota keluarga sakit, sementara kehilangan pendapatan utama dapat membuat beban itu bertambah. Pekerja migran mungkin tidak masuk daftar penerima lokal, sedangkan masyarakat adat menghadapi proses administrasi yang tidak sesuai dengan bukti hak mereka. Analisis distribusi membantu pemerintah menyesuaikan bantuan agar tidak memperbesar ketimpangan.

Kesehatan mental dapat terganggu oleh pengalaman kehilangan rumah, ketidakpastian kesehatan, pengungsian, dan konflik sosial. Dukungan komunitas, layanan psikologis, ruang aman, kegiatan anak, dan pendampingan dapat membantu pemulihan. Intervensi perlu menghormati pilihan warga dan

tidak memaksakan label klinis. Petugas yang memberikan layanan juga memerlukan dukungan karena mereka dapat mengalami kelelahan dan tekanan setelah bekerja dalam operasi panjang.

Pemulihan sosial dan restorasi ekologi saling berhubungan. Jika keluarga kehilangan akses terhadap sumber penghasilan lalu tidak memiliki alternatif, tekanan untuk membuka atau membakar lahan dapat kembali muncul. Program restorasi yang melibatkan warga dalam pekerjaan pemulihan, pemantauan, pembibitan, dan pengelolaan air dapat menyediakan manfaat ekonomi sekaligus memperkuat kepemilikan sosial. Namun, pekerjaan tersebut harus dibayar wajar dan tidak menggantikan tanggung jawab perusahaan atau negara.

39. Strategi evaluasi hasil dan pembelajaran berkelanjutan

Evaluasi kebijakan dapat menggunakan kerangka input, kegiatan, output, outcome, dan dampak. Input mencakup anggaran, personel, alat, dan data. Kegiatan mencakup patroli, pemeliharaan, penyuluhan, serta pemulihan. Output dapat berupa jumlah desa yang memiliki rencana atau kanal yang ditangani. Outcome mengukur perubahan kondisi dan perilaku, seperti naiknya muka air, berkurangnya pembakaran, atau meningkatnya waktu respons. Dampak mencakup penurunan paparan, penyakit, kerusakan ekosistem, kerugian, dan kematian. Pembedaan ini mencegah laporan keberhasilan yang hanya menjumlahkan kegiatan.

Baseline perlu dibuat sebelum intervensi. Data historis mengenai hotspot, luas terbakar, curah hujan, muka air, kunjungan kesehatan, gangguan sekolah, dan penghidupan membantu menilai perubahan. Lokasi pembanding harus dipilih secara hati-hati karena karakter gambut, akses, dan pola penggunaan lahan mungkin berbeda. Evaluasi dapat memadukan data kuantitatif, wawancara, dan observasi, sehingga perubahan angka dapat dijelaskan oleh mekanisme lapangan.

Evaluasi perlu menangkap efek tidak diinginkan. Pembasahan pada satu bagian dapat mengubah akses air bagi pengguna lain; larangan api dapat menambah biaya pengolahan lahan; pembatasan akses dapat mengganggu mata pencaharian; dan program insentif dapat menimbulkan konflik penerima manfaat. Mekanisme keluhan dan diskusi rutin membantu mendeteksi efek tersebut lebih dini. Program yang adaptif dapat mengubah desain tanpa mengabaikan tujuan perlindungan.

Hasil evaluasi harus dapat diakses dan diperdebatkan. Pemerintah dapat menerbitkan ringkasan metodologi, data agregat, peta, dan rekomendasi, sementara lembaga independen melakukan verifikasi. Ketidakpastian dan keterbatasan perlu dicatat secara eksplisit. Jika intervensi tidak berhasil, penyebabnya harus ditelusuri agar anggaran berikutnya tidak mengulang pola yang sama. Mengakui kelemahan program merupakan bagian dari tata kelola yang bertanggung jawab.

Pembelajaran berkelanjutan memerlukan forum yang menghubungkan peneliti, pembuat kebijakan, petugas, perusahaan, sekolah, dan warga. Forum dapat meninjau hasil sebelum musim bahaya dan sesudahnya, memperbarui ambang peringatan, serta menyepakati prioritas penelitian. Pengetahuan harus bergerak dua arah: bukti ilmiah diterjemahkan menjadi keputusan praktis, sementara pengalaman lapangan menjadi pertanyaan penelitian baru. Siklus ini mempercepat perbaikan sistem dari satu musim ke musim berikutnya.

40. Kerangka terpadu sumber PM2.5, paparan, kesehatan, dan kebijakan

Kerangka analisis PM2.5 dapat mengikuti rantai kausal dari pendorong kebakaran hingga hasil kesehatan. Pada hulu terdapat tata guna lahan, drainase, praktik pembukaan, cuaca, dan pengelolaan vegetasi. Kejadian kebakaran menghasilkan emisi yang bergantung pada bahan bakar dan cara pembakaran. Emisi bergerak dan berubah di atmosfer, menghasilkan konsentrasi PM2.5 pada waktu dan lokasi tertentu. Konsentrasi berinteraksi dengan aktivitas manusia dan kondisi rumah membentuk paparan dan dosis.

Dosis bersama sensitivitas, kesehatan dasar, dan kapasitas perlindungan berkaitan dengan gejala, penggunaan layanan, penyakit, atau kematian.

Setiap mata rantai menuntut ukuran dan metode berbeda. Titik panas tidak mengukur PM2.5; konsentrasi udara bukan dosis personal; diagnosis klinis tidak selalu mencatat paparan; hubungan statistik tidak otomatis menetapkan pelaku sumber. Kerangka ini membantu menghindari kesimpulan yang melompati bukti. Contohnya, jika kebakaran terjadi pada suatu lanskap dan kunjungan klinik meningkat, peneliti tetap perlu menguji transportasi asap, konsentrasi permukaan, waktu jeda, sumber polusi lain, dan tren penyakit.

Intervensi dapat ditempatkan di beberapa titik rantai. Pengelolaan gambut dan pencegahan sumber api mengurangi emisi; jaringan monitor dan model meningkatkan pengenalan paparan; rumah bersih dan perubahan kegiatan mengurangi dosis; layanan klinis mengurangi komplikasi; dan perlindungan sosial membantu rumah tangga menjalankan rekomendasi. Pengendalian emisi di hulu memberikan manfaat luas, sedangkan intervensi personal memberi perlindungan langsung yang tidak selalu merata. Strategi yang kuat menggabungkan kedua bentuk tindakan dan menilai siapa yang memperoleh manfaat.

Evaluasi harus membedakan indikator proses dan hasil. Jumlah sensor yang dibeli adalah indikator input; cakupan dan mutu data menunjukkan kapasitas pengukuran; berkurangnya jumlah hari dengan PM2.5 tinggi menunjukkan hasil kualitas udara; penurunan gangguan pernapasan adalah hasil kesehatan yang juga dipengaruhi faktor lain. Indikator yang terhubung dengan rantai kausal membantu pimpinan menghindari klaim bahwa satu pelatihan atau perangkat langsung menyebabkan penurunan penyakit.

Ketidakpastian dapat direpresentasikan dalam analisis sensitivitas, rentang estimasi, skenario sumber emisi, dan validasi lapangan. Dalam pengambilan keputusan, pemerintah dapat membandingkan manfaat pencegahan, biaya respons, potensi dampak kesehatan, distribusi manfaat, dan konsekuensi jika intervensi gagal. Hasil perlu disampaikan dalam bahasa yang dapat dipahami

pengambil keputusan dan warga tanpa menghapus kompleksitas yang penting.

Kerangka ini memerlukan kerja lintas disiplin. Ahli kebakaran menilai bahan bakar dan proses pembakaran; ahli atmosfer mengestimasi emisi dan dispersi; ahli kesehatan lingkungan menilai dosis; epidemiolog menghubungkan paparan dan luaran; tenaga klinis menerangkan pola penyakit; ekonom menilai biaya dan distribusi; ilmuwan sosial memahami perilaku serta kapasitas; dan manajer publik menyusun pelaksanaan serta akuntabilitas. Sistem data harus menghubungkan bidang tersebut tanpa menyamakan semua jenis bukti.

Keputusan akhir perlu mengidentifikasi pihak yang bertanggung jawab untuk setiap tindakan: siapa memelihara sensor, siapa menerbitkan peringatan, siapa membuka ruang bersih, siapa menyediakan obat, siapa melindungi pekerja, siapa menyelidiki kebakaran, dan siapa mengevaluasi dampak. Tanggung jawab yang terang mengubah pemahaman ilmiah tentang PM2.5 menjadi perlindungan kesehatan yang dapat diperiksa.

41. Pengelolaan risiko dari tingkat desa hingga lanskap

Pemetaan risiko di tingkat desa perlu dimulai dari pengalaman yang sudah ada. Warga dapat menandai lokasi api berulang, kanal yang mengeringkan lahan, sumber air yang masih tersedia, jalur evakuasi, sekolah, puskesmas, dan lokasi yang sulit dijangkau. Peta tersebut kemudian dibandingkan dengan data satelit, citra tutupan lahan, informasi cuaca, dan peta hidrologi. Perbedaan antara pengetahuan lokal dan data teknis perlu dibahas bersama, karena dapat menunjukkan perubahan yang belum tercatat atau ketidakakuratan salah satu sumber.

Peta desa sebaiknya mengidentifikasi siapa yang bertanggung jawab atas tindakan tertentu. Jika muka air pada blok gambut turun, siapa yang memeriksa pintu air? Jika sensor menunjukkan risiko tinggi, siapa yang memulai patroli? Jika udara mencapai ambang berbahaya, siapa yang

menghubungi sekolah dan warga rentan? Pembagian ini mencegah peta berhenti sebagai dokumen proyek. Tanggung jawab perlu disepakati sebelum musim kemarau dan diperbarui ketika pengurus desa atau petugas berganti.

Pada tingkat lanskap, risiko sering melampaui batas administratif. Air bergerak pada kesatuan hidrologis, api dapat berpindah melalui vegetasi dan kanal, sementara asap mengikuti angin ke kabupaten lain. Karena itu, forum antardesa atau kabupaten perlu menyelaraskan tindakan. Satu desa yang membasahi kanal tanpa koordinasi mungkin tidak mampu melindungi seluruh blok gambut jika wilayah lain terus mengeringkan lahan. Perencanaan lanskap membantu menyelaraskan investasi, patroli, dan pengelolaan air.

Pemerintah provinsi dapat membantu menghubungkan peta desa dengan sistem data pusat serta memastikan daerah yang memiliki kapasitas teknis terbatas mendapat dukungan. Proses ini tidak berarti mengambil alih pengetahuan lokal. Pemerintah dapat menyediakan standar dan perangkat, sementara masyarakat mengisi informasi penggunaan lahan, akses, serta titik yang tidak terlihat pada citra satelit. Data yang dihasilkan bersama lebih mungkin digunakan karena warga memahami asal-usul dan tujuan peta.

Peta risiko perlu memiliki versi publik dan versi operasional. Versi publik berisi informasi yang membantu warga memahami bahaya, tindakan perlindungan, dan kanal bantuan. Versi operasional dapat memuat lokasi infrastruktur, sumber air, serta jadwal personel yang lebih rinci. Pengaturan akses melindungi keamanan tanpa menutup seluruh informasi yang menjadi hak publik. Perubahan data, tanggal verifikasi, dan tingkat keyakinan perlu dicatat agar pengguna tidak menganggap semua informasi memiliki kepastian yang sama.

Setelah setiap musim api, pemerintah desa dapat mengadakan evaluasi untuk memperbarui peta dan daftar prioritas. Perubahan penggunaan lahan, kerusakan sekat, akses jalan baru, perpindahan warga, serta hasil restorasi dapat mengubah risiko. Pemeriksaan berkala mengurangi ketergantungan pada peta lama yang tidak lagi menggambarkan kondisi lapangan.

Pengetahuan yang terbarui menjadi modal untuk tindakan pencegahan pada tahun berikutnya.

42. Rencana kesehatan masyarakat dan standar kesiapsiagaan

Rencana kesehatan masyarakat untuk musim asap harus menghubungkan pemantauan PM2.5, prakiraan, peringatan, layanan klinis, perlindungan kelompok berisiko, dan komunikasi publik. Dinas kesehatan menetapkan titik koordinasi dengan lembaga lingkungan, BMKG, rumah sakit, puskesmas, sekolah, dan pemerintah desa. Prosedur menerangkan bagaimana data diterima, diverifikasi, diterjemahkan menjadi tindakan, dan diperbarui. Setiap wilayah perlu menentukan siapa yang dapat mengaktifkan layanan tambahan dan sumber daya apa yang tersedia.

Kesiapsiagaan layanan kesehatan mencakup perkiraan peningkatan keluhan respirasi dan kardiovaskular, jadwal tenaga, kesinambungan pengobatan, jalur rujukan, pengelolaan ambulans, cadangan listrik, dan kualitas udara ruang perawatan. Rumah sakit dan klinik dapat menilai infiltrasi asap, filtrasi, ruang tunggu, dan prosedur perlindungan tenaga kerja. Rencana tidak boleh menutup akses bagi layanan rutin, sebab penundaan antenatal, dialisis, pengobatan penyakit jantung, atau pelayanan anak dapat menimbulkan bahaya tambahan.

Puskesmas, bidan, posyandu, dan kader kesehatan mempunyai hubungan yang dekat dengan warga. Mereka dapat menjelaskan cara membaca peringatan, mengenali gejala yang perlu diperiksa, menjaga obat rutin, dan mengakses tempat dengan udara lebih bersih. Pelatihan harus membedakan edukasi kesehatan masyarakat dari diagnosis; petugas perlu jalur untuk berkonsultasi dan merujuk warga. Kader dan petugas lapangan membutuhkan alat, transportasi, kompensasi, serta perlindungan dari paparan yang mereka hadapi saat menyampaikan bantuan.

Ruang udara bersih publik dapat disiapkan pada fasilitas yang mudah dijangkau seperti sekolah, balai desa, atau gedung pelayanan, dengan syarat

kualitas udara benar-benar dikelola. Kebutuhan meliputi filtrasi yang sesuai, pengendalian suhu, listrik, kapasitas, area istirahat, air minum, toilet, aksesibilitas, dan prosedur operasi. Gedung yang sekadar tertutup belum tentu menjadi ruang aman jika udara panas, padat, atau tidak tersaring. Lokasi, jam buka, transportasi, dan layanan pendamping harus diumumkan sebelum episode berlangsung.

Kesiapan kelompok berisiko harus spesifik. Lansia yang tinggal sendiri mungkin memerlukan pemeriksaan kondisi dan transportasi; ibu hamil membutuhkan kesinambungan layanan maternal dan persalinan; anak memerlukan koordinasi sekolah dan pengasuhan; penderita asma perlu akses obat sesuai rencana klinis; pekerja luar ruang membutuhkan perubahan kerja dan perlindungan. Perencanaan tidak boleh menganggap setiap anggota suatu kelompok memiliki kondisi yang sama, serta perlu memberi pilihan dan menjaga martabat warga.

Surveilans kesehatan selama episode dapat memantau gejala, kunjungan klinik, rawat inap, penggunaan obat, absensi sekolah, serta gangguan layanan rutin. Definisi indikator harus tetap dan dicatat supaya perubahan dapat dibandingkan. Data dipilah secara aman menurut wilayah dan kelompok untuk melihat ketimpangan, tetapi identitas individu tidak perlu dipublikasikan. Penafsiran harus memperhitungkan infeksi, suhu, musim, tren pelayanan, dan hambatan akses yang dapat mengubah angka tercatat.

Komunikasi risiko harus menghubungkan kualitas udara dengan tindakan realistis. Pesan menyatakan lokasi, waktu, sumber dan ketidakpastian data, kelompok yang perlu perhatian, langkah perlindungan, tempat bantuan, serta waktu pembaruan selanjutnya. Pesan dapat didistribusikan melalui radio lokal, sekolah, fasilitas kesehatan, telepon, pengeras suara desa, dan organisasi masyarakat. Versi bahasa daerah serta format yang dapat diakses membantu warga yang tidak menggunakan aplikasi digital.

Setelah musim kebakaran, tinjauan bersama mengevaluasi apakah pemantauan menjangkau lokasi yang terpapar, apakah peringatan sampai

kepada warga, apakah ruang bersih digunakan, apakah layanan klinis tetap berjalan, dan apakah beban paparan menurun. Evaluasi tidak berhenti pada jumlah perangkat atau rapat. Temuan perlu mengubah anggaran, protokol, lokasi sensor, dan pembagian tanggung jawab pada siklus berikutnya.

43. Kewajiban rantai pasok dan pengadaan yang bertanggung jawab

Rantai pasok komoditas memiliki pengaruh karena keputusan pembelian memberi sinyal ekonomi kepada produsen. Pembeli dapat mensyaratkan keterlacakan kebun, kepatuhan terhadap perlindungan gambut, pencegahan kebakaran, dan mekanisme keluhan. Persyaratan harus jelas sejak kontrak dimulai, bukan baru diperkenalkan setelah terjadi krisis. Pemasok membutuhkan panduan, waktu penyesuaian, dan dukungan yang proporsional agar standar tidak hanya dapat dipenuhi oleh perusahaan besar.

Keterlacakan perlu menghubungkan bahan baku dengan lokasi produksi melalui informasi yang dapat diverifikasi. Data rantai pasok dapat menggabungkan identitas pemasok, poligon kebun, status lahan, sumber bahan, dan catatan kejadian. Informasi ini sensitif secara komersial, tetapi dapat dibagikan kepada auditor atau otoritas dengan protokol yang melindungi privasi serta persaingan usaha. Tujuannya adalah memastikan penilaian tidak hanya dilakukan pada tingkat perusahaan induk, tetapi menjangkau lokasi sumber risiko.

Pengadaan pemerintah dapat memberi pasar bagi produk yang dihasilkan tanpa pembakaran dan tanpa konversi ekosistem bernilai tinggi. Pemerintah dapat menggunakan kriteria keberlanjutan dalam pembelian pangan, bahan bangunan, atau jasa yang relevan. Syarat perlu dapat dipenuhi oleh koperasi, usaha kecil, dan kelompok masyarakat melalui pendampingan teknis. Bila standar terlalu kompleks, pemasok kecil dapat dikeluarkan dan konsentrasi pasar meningkat tanpa mengurangi kebakaran.

Sistem keluhan yang efektif menyediakan kanal bagi pekerja, masyarakat, dan pemasok untuk melaporkan kebakaran atau tekanan yang mendorong praktik

berisiko. Kanal harus aman, mudah digunakan, memiliki batas waktu respons, dan mencegah pembalasan terhadap pelapor. Laporan yang masuk perlu diverifikasi dan disalurkan kepada pihak yang memiliki kewenangan. Data keluhan agregat dapat membantu mendeteksi pola masalah sebelum menjadi krisis besar.

Investor dapat mengintegrasikan paparan kebakaran ke dalam analisis risiko fisik dan transisi. Risiko fisik mencakup kerusakan aset, gangguan operasi, dan kesehatan tenaga kerja. Risiko transisi mencakup perubahan aturan, tuntutan pasar, biaya restorasi, dan reputasi. Penilaian yang baik tidak berhenti pada skor, tetapi menunjukkan tindakan perusahaan, investasi yang diperlukan, dan kemajuan yang dapat diverifikasi. Lembaga keuangan dapat meminta rencana pemulihan dan pengungkapan data sebagai bagian dari pembiayaan.

Penghentian hubungan dengan pemasok perlu dilakukan secara proporsional. Pemutusan dapat mengurangi risiko reputasi, tetapi jika dilakukan tanpa proses perbaikan dapat memindahkan produksi ke pembeli lain yang tidak menerapkan standar. Dalam kasus pelanggaran berat atau berulang, sanksi tegas dapat diperlukan; dalam kasus awal yang dapat diperbaiki, dukungan dan tenggat terukur dapat menghasilkan perubahan. Keputusan harus menjelaskan bukti, konsekuensi, serta mekanisme banding dan verifikasi.

44. Ekonomi restorasi dan model penghidupan lanskap basah

Restorasi gambut menciptakan kebutuhan akan pekerjaan jangka pendek dan kompetensi jangka panjang. Warga dapat terlibat dalam pemetaan kanal, pembangunan dan pemeliharaan sekat, pembibitan spesies lokal, pemantauan muka air, pengendalian spesies invasif, dan pengawasan kebakaran. Pekerjaan ini perlu dibayar dengan standar wajar dan disertai pelatihan yang mengakui keterampilan. Jika pekerjaan restorasi hanya datang sebagai proyek sementara, manfaat ekonomi dapat menghilang setelah pendanaan berakhir.

Usaha yang sesuai dengan lanskap basah perlu ditentukan melalui penelitian dan pengalaman lokal. Produk non-kayu, budidaya yang tidak memerlukan

drainase dalam, perikanan, madu, hasil hutan bukan kayu, dan jasa wisata dapat menjadi pilihan pada kondisi tertentu. Tidak semua model usaha dapat diterapkan di setiap lokasi; pasar, akses transportasi, kapasitas pengolahan, kualitas air, dan hak masyarakat memengaruhi kelayakan. Studi kelayakan partisipatif dapat menghindari promosi produk yang tidak memiliki pembeli atau menambah tekanan ekologis.

Model bisnis restorasi harus memperhitungkan manfaat publik yang tidak dapat ditangkap oleh penjualan produk saja. Pengurangan asap, emisi, risiko kesehatan, dan kehilangan biodiversitas adalah manfaat yang diterima masyarakat luas. Skema pembayaran jasa ekosistem atau pembiayaan iklim dapat membantu menutup kesenjangan nilai tersebut, tetapi harus transparan tentang siapa yang menerima pembayaran, indikator yang digunakan, dan bagaimana hak atas lahan dihormati. Pembayaran tidak boleh meniadakan kewajiban dasar pemegang izin.

Pengembangan usaha lokal perlu menghindari ketergantungan pada satu komoditas yang rentan terhadap harga atau iklim. Diversifikasi dapat menyebar risiko, tetapi membutuhkan akses pembiayaan, pelatihan, koperasi, dan jaringan distribusi. Perempuan dan pemuda perlu mendapat akses pada aset, keterampilan, dan posisi pengambilan keputusan, bukan hanya pekerjaan tambahan yang tidak dibayar. Evaluasi usaha perlu melihat pendapatan bersih, stabilitas sepanjang tahun, pembagian manfaat, dan pengaruhnya terhadap praktik penggunaan lahan.

Pemerintah daerah dapat memasukkan ekonomi restorasi ke dalam strategi pengembangan wilayah. Pengadaan bibit, alat, jasa pemantauan, dan pemeliharaan dapat melibatkan badan usaha lokal bila mutu dan keselamatan memenuhi standar. Universitas dan lembaga pelatihan dapat membantu sertifikasi kompetensi. Dengan demikian, restorasi tidak hanya bergantung pada kontraktor luar dan menghasilkan kapasitas yang tinggal di daerah setelah proyek selesai.

Keberhasilan ekonomi restorasi tetap dinilai bersama kondisi ekologi. Pendapatan tidak dapat dianggap berkelanjutan jika diperoleh dengan mengeringkan gambut kembali, membebani air warga lain, atau mengganti vegetasi asli dengan monokultur yang mudah terbakar. Rencana usaha perlu memiliki batas ekologis, pemantauan, dan mekanisme penghentian jika dampak tidak sesuai. Penghidupan yang tahan bencana merupakan bagian dari pencegahan, bukan agenda yang terpisah dari konservasi.

45. Prinsip etis untuk penelitian, media, dan kebijakan

Penelitian dan kebijakan kebakaran bekerja dengan data yang dapat berpengaruh pada reputasi, hak, mata pencaharian, dan kesehatan. Karena itu, klaim tentang sebab atau tanggung jawab perlu sepadan dengan bukti. Peneliti harus membedakan analisis asosiasi, estimasi model, laporan kejadian, dan temuan investigasi. Media perlu menyebut sumber serta tanggal; pemerintah perlu menghindari pernyataan yang melampaui bukti. Kehati-hatian tidak berarti menunda tindakan perlindungan publik ketika bahaya sudah nyata.

Prinsip keterbukaan harus diseimbangkan dengan privasi dan keselamatan. Data agregat kualitas udara, lokasi terbakar, dan anggaran publik sebaiknya dapat diakses. Identitas pasien, pelapor, atau saksi perlu dilindungi. Data masyarakat adat dan pengetahuan lokal harus digunakan dengan persetujuan dan pengakuan. Peta yang membuka lokasi sensitif dapat menimbulkan risiko baru, sehingga perlu pengaturan akses dan tujuan penggunaan.

Penelitian yang melibatkan masyarakat perlu mengembalikan manfaat kepada peserta. Hasil dapat disampaikan melalui pertemuan lokal, ringkasan bahasa sederhana, peta, atau materi pendidikan. Kompensasi waktu, perlindungan informan, dan saluran koreksi harus dipertimbangkan. Warga tidak seharusnya hanya menjadi sumber data bagi publikasi yang tidak dapat mereka akses. Kemitraan yang setara meningkatkan kualitas bukti karena peserta dapat mengoreksi interpretasi yang keliru.

Komunikasi kebijakan perlu mengakui ketidakpastian tanpa mengaburkan tanggung jawab. Informasi bahwa penyebab kebakaran masih diselidiki tidak menghalangi pemerintah untuk mengendalikan sumber api, melindungi warga, atau memeriksa kewajiban pengelolaan. Sebaliknya, bukti bahwa suatu wilayah terbakar tidak otomatis menjawab siapa pelakunya. Bahasa yang tepat membantu publik memahami tahapan proses dan mengurangi polarisasi yang tidak produktif.

Keadilan prosedural juga berlaku saat pemerintah menetapkan zona larangan, membatasi akses, atau melakukan relokasi. Warga perlu mengetahui dasar keputusan, durasi, kompensasi, dan jalur pengaduan. Langkah darurat harus proporsional dengan risiko dan ditinjau berkala. Apabila pembatasan berlangsung lama, pemerintah perlu menyediakan alternatif untuk bekerja, belajar, memperoleh pangan, serta menjalankan praktik budaya.

Etika publik menuntut evaluasi terhadap dampak kebijakan, termasuk dampak yang tidak direncanakan. Program yang mengurangi kebakaran tetapi memperburuk kemiskinan atau menyingkirkan masyarakat dapat kehilangan legitimasi dan pada akhirnya tidak berkelanjutan. Kebijakan yang baik menggabungkan perlindungan ekologi dengan pengakuan hak, kesejahteraan, dan akuntabilitas. Hal tersebut membutuhkan konsultasi terus-menerus, bukan satu kali persetujuan formal.

46. Agenda penelitian PM2.5 dan kesehatan di Indonesia

Agenda penelitian Indonesia perlu memperluas pengukuran PM2.5 di daerah yang mengalami kebakaran gambut, wilayah hilir asap, dan lokasi perkotaan penerima plume. Jaringan sensor berbiaya rendah dapat membantu mengisi celah jika dikalibrasi dan dipelihara. Kolokasi dengan alat rujukan, pengukuran dalam-luar ruang, survei aktivitas, serta pencatatan suhu dan kelembapan dapat memperbaiki estimasi paparan. Keterlibatan masyarakat dibutuhkan untuk memilih lokasi yang mewakili tempat warga benar-benar tinggal dan bekerja.

Studi sumber dan komposisi perlu membandingkan kebakaran gambut, biomassa permukaan, pembakaran lahan, dan sumber perkotaan. Analisis karbon organik, karbon hitam, ion, logam, dan senyawa organik dapat menjelaskan variasi toksisitas, sedangkan pengukuran gas membantu memisahkan kontribusi campuran. Penelitian toksikologi dan paparan manusia perlu menjaga relevansi dosis dan komposisi terhadap kondisi ambien Indonesia. Hasil tersebut mendukung perbaikan faktor emisi dan model dispersi.

Epidemiologi lokal memerlukan data harian dan jangka panjang tentang gejala pernapasan, asma, rawat inap, kejadian kardiovaskular, mortalitas, kehamilan, berat lahir, dan perkembangan anak. Rancangan harus menetapkan periode paparan, jeda waktu, wilayah pembanding, variabel perancu, dan metode validasi. Penggabungan data lingkungan serta kesehatan harus tunduk pada persetujuan, tata kelola akses, de-identifikasi, dan keamanan. Studi multicenter dapat meningkatkan keterwakilan provinsi dan memungkinkan analisis perbedaan gambut, penggunaan lahan, dan sistem layanan.

Penelitian harus menilai heterogenitas dampak menurut usia, jenis kelamin, kehamilan, penyakit kronis, pekerjaan, status ekonomi, dan kualitas rumah. Kelompok yang paling terpapar mungkin tidak tercakup dalam sistem kesehatan formal. Survei rumah tangga, pemantauan personal terbatas, dan data komunitas dapat melengkapi rekam klinis. Peneliti perlu melaporkan siapa yang tidak terwakili dan bagaimana keterbatasan tersebut memengaruhi kesimpulan.

Intervensi perlindungan perlu diuji untuk mengetahui efektivitas dalam konteks lokal. Studi dapat mengevaluasi filtrasi di sekolah dan klinik, ruang udara bersih komunitas, pesan peringatan, perubahan jadwal kerja, dukungan transportasi, dan distribusi respirator. Luaran dapat mencakup perubahan konsentrasi dalam ruang, dosis yang diperkirakan, gejala, penggunaan fasilitas, biaya, penerimaan, serta efek samping seperti panas dan hilangnya

pendapatan. Uji implementasi dan evaluasi kebijakan membantu mengetahui apakah program dapat diperluas secara adil.

Model dampak kesehatan harus dikalibrasi dengan data emisi dan paparan Indonesia. Fungsi paparan-respons dari populasi luar negeri berguna sebagai titik awal, tetapi perlu analisis sensitivitas dan validasi dengan pola penyakit lokal. Studi Graham et al. (2024) menunjukkan manfaat penggabungan sensor lokal, model atmosfer regional, dan survei aktivitas untuk menajamkan estimasi. Replikasi dan perluasan ke wilayah lain dapat menguji apakah hasilnya konsisten.

Riset kualitatif dan partisipatif dapat menerangkan bagaimana warga memahami indeks kualitas udara, mengubah perilaku, menghadapi hambatan kerja, dan menilai kredibilitas pesan. Pengalaman lansia, ibu hamil, penyandang disabilitas, pekerja informal, masyarakat adat, dan tenaga kesehatan perlu didengar langsung. Temuan kualitatif tidak menggantikan epidemiologi, tetapi mengungkap mekanisme sosial yang menentukan apakah perlindungan tersedia dan dapat digunakan.

Agenda nasional dapat menghubungkan universitas, BRIN, dinas kesehatan, BMKG, pemerintah daerah, rumah sakit, organisasi masyarakat, dan mitra internasional melalui protokol terbuka. Prioritas perlu disusun berdasarkan beban paparan, kesenjangan data, relevansi kebijakan, dan manfaat bagi komunitas, bukan sekadar kemudahan memperoleh dataset. Pendanaan jangka panjang penting karena satu musim tidak cukup untuk memahami paparan kronis, perkembangan anak, dan perubahan kebijakan.

47. Ketahanan layanan kesehatan dan infrastruktur dasar

Kebakaran dan asap dapat mengganggu listrik, telekomunikasi, transportasi, air bersih, dan layanan dasar. Infrastruktur harus dinilai berdasarkan risiko kebakaran dan kualitas udara, terutama fasilitas kesehatan, sekolah, pusat evakuasi, pelabuhan udara, dan jaringan distribusi air. Rencana kontinuitas layanan perlu menentukan pasokan listrik cadangan, penyimpanan obat, jalur

alternatif, jadwal komunikasi, serta petugas pengganti bila sebagian tenaga tidak dapat bekerja.

Jalan dan kanal merupakan infrastruktur yang dapat memberi manfaat ekonomi sekaligus mengubah risiko lanskap. Jalan membuka akses bagi layanan dan pasar, tetapi juga dapat meningkatkan fragmentasi serta akses untuk pembukaan lahan. Kanal membantu transportasi dan pengelolaan air, tetapi drainase yang tidak sesuai dapat mengeringkan gambut. Penilaian proyek perlu menggabungkan manfaat sosial dengan perubahan hidrologi, akses kebakaran, dan biaya pemeliharaan. Desain ulang, zona penyangga, pintu air, atau pembatasan akses dapat mengurangi sebagian risiko.

Fasilitas publik dapat dirancang sebagai titik perlindungan sementara ketika kualitas udara memburuk. Gedung sekolah, balai desa, dan puskesmas dapat dipilih berdasarkan lokasi, akses, kapasitas, serta kemampuan memperbaiki udara dalam ruang. Penetapan fasilitas perlu dikomunikasikan lebih awal agar warga tidak mencari tempat perlindungan ketika asap sudah berat. Pemerintah dapat menguji kesiapan melalui simulasi, termasuk skenario listrik padam, jalan tertutup, dan peningkatan kebutuhan layanan.

Transportasi darurat memerlukan protokol untuk pasien, warga tanpa kendaraan, serta daerah yang terisolasi. Pengelola angkutan umum dapat mengatur rute atau jam layanan ketika visibilitas rendah, sementara otoritas penerbangan dan pelabuhan menggunakan data meteorologi serta keselamatan untuk keputusan operasional. Informasi gangguan harus segera tersedia agar warga dapat merencanakan perjalanan. Perlindungan petugas transportasi dan pekerja luar ruang juga perlu diperhitungkan.

Ketahanan infrastruktur tidak hanya ditentukan oleh desain, tetapi juga pemeliharaan. Filter udara harus diganti, genset diuji, pompa air dirawat, kanal diperiksa, dan jaringan komunikasi diperbarui. Anggaran pemeliharaan perlu dicantumkan sejak awal, bukan diandalkan setelah terjadi keadaan darurat. Audit berkala dapat memastikan fasilitas yang tercatat siap memang dapat digunakan dan mampu melayani warga dengan kebutuhan berbeda.

48. Mekanisme akuntabilitas dan tinjauan tahunan

Akuntabilitas karhutla sebaiknya memiliki siklus tahunan yang menghubungkan perencanaan, pelaksanaan, pelaporan, dan koreksi. Sebelum musim kering, pemerintah dapat memublikasikan sasaran pencegahan dan pembagian tanggung jawab. Selama musim, dashboard melaporkan indikator bahaya, tindakan, penggunaan anggaran, dan kebutuhan dukungan. Setelah musim, tinjauan menilai hasil, korban, paparan, kerusakan, serta tindakan yang belum selesai. Siklus tersebut membantu warga melihat apakah janji sebelum krisis diwujudkan.

Tinjauan tahunan perlu melibatkan lembaga yang berbeda dari pelaksana program untuk memeriksa bukti secara independen. Auditor dapat memeriksa pembelian dan penggunaan alat; peneliti menilai data lingkungan dan kesehatan; masyarakat menilai kualitas konsultasi, akses bantuan, serta respons pengaduan. Tidak setiap indikator memerlukan audit lapangan penuh, tetapi sampel verifikasi dan publikasi metode meningkatkan kredibilitas. Temuan harus disertai rekomendasi yang memiliki pihak penanggung jawab dan tenggat.

Sistem pengaduan perlu mencatat jenis laporan, lokasi, waktu respons, hasil pemeriksaan, dan alasan penutupan kasus. Warga harus dapat melacak laporan tanpa harus menghubungi banyak kantor. Laporan dugaan kebakaran, kegagalan infrastruktur, ketidaktersediaan bantuan, atau paparan berbahaya dapat diarahkan kepada unit berbeda tetapi tetap memiliki nomor pelacakan. Perlindungan pelapor dan data pribadi harus menjadi bagian desain sejak awal.

Manajemen risiko membutuhkan pemilik untuk setiap risiko penting. Risiko penurunan muka air, kerusakan sekat kanal, keterlambatan bantuan, gangguan layanan kesehatan, atau kegagalan peringatan harus memiliki indikator, ambang tindakan, dan pihak yang bertanggung jawab. Rapat koordinasi mengevaluasi apakah risiko meningkat dan apakah respons perlu diubah. Dengan pendekatan ini, tanggung jawab tidak menghilang di antara lembaga yang memiliki mandat beririsan.

Tinjauan juga harus menyediakan ruang bagi perubahan kebijakan. Bila indikator menunjukkan tidak ada pengurangan kebakaran berulang, pemerintah dapat meninjau kembali perizinan, insentif, atau desain program. Jika layanan kesehatan tidak menjangkau kelompok berisiko, anggaran dan metode distribusi perlu diubah. Akuntabilitas bukan hanya mencari kesalahan setelah kejadian; ia adalah mekanisme untuk memastikan organisasi belajar dan mengoreksi tindakannya secara terbuka.

49. Integrasi agenda ke dalam siklus pembangunan daerah

Mitigasi karhutla perlu masuk ke dokumen pembangunan daerah, penganggaran, perizinan, rencana kesehatan, dan strategi adaptasi iklim. Dengan integrasi tersebut, pencegahan tidak bergantung pada satu unit atau satu proyek. Setiap program infrastruktur dan ekonomi dapat diuji terhadap pengaruhnya pada air, bahan bakar, akses, serta paparan penduduk.

Rencana pembangunan harus menetapkan target tahunan yang dapat diverifikasi. Target dapat mencakup pemeliharaan hidrologi, dukungan usaha tanpa bakar, cakupan pemantauan udara, kesiapan layanan kesehatan, dan keselamatan petugas. Target perlu dilengkapi biaya, sumber dana, dan pejabat penanggung jawab agar tidak menjadi daftar aspirasi.

Integrasi juga berarti menghubungkan jadwal. Pemeriksaan kanal, latihan pemadaman, penyediaan obat, dan pembaruan peta harus selesai sebelum periode kering diperkirakan dimulai. Keterlambatan satu fungsi dapat melemahkan fungsi lainnya. Pemerintah dapat menggunakan kalender bersama untuk meninjau kesiapan lintas sektor.

Forum pembangunan daerah dapat mengundang perwakilan masyarakat, universitas, perusahaan, dan organisasi sipil untuk menelaah risiko serta kemajuan. Partisipasi perlu menghasilkan keputusan yang dapat dilacak. Masukan yang diterima, ditolak, atau ditunda sebaiknya disertai alasan, sehingga warga dapat menilai bagaimana pengetahuan dan kebutuhan mereka dipertimbangkan.

Pada akhirnya, integrasi agenda adalah cara mengubah pengalaman bencana menjadi keputusan pembangunan. Lahan yang tidak lagi dikeringkan, usaha yang tidak bergantung pada api, layanan yang siap melindungi kesehatan, dan anggaran yang mengutamakan pencegahan merupakan perubahan yang dapat diamati dari tahun ke tahun.

50. Kesimpulan dan agenda perlindungan dari PM2.5

PM2.5 dari kebakaran hutan dan lahan merupakan campuran partikulat halus yang dapat terbawa jauh dan memasuki lingkungan tempat orang tinggal, belajar, bekerja, dan memperoleh layanan. Risiko kesehatan dipengaruhi konsentrasi, durasi, komposisi, pola aktivitas, infiltrasi ke ruang dalam, dosis terhirup, kesehatan dasar, dan kemampuan mengurangi paparan. Hubungan antara sumber api, udara, dosis, dan penyakit tidak dapat disimpulkan dari satu angka kualitas udara atau satu gejala saja; pemahaman yang kuat menggabungkan pengukuran, model, epidemiologi, dan pengetahuan klinis.

Bukti paling konsisten untuk asap kebakaran berkaitan dengan gangguan respirasi dan peningkatan pemanfaatan layanan kesehatan. Bukti untuk dampak kardiovaskular, luaran kehamilan, perkembangan, dan efek jangka panjang terus berkembang dan bervariasi menurut studi, populasi, dan metode pengukuran. Ketidakpastian perlu dijelaskan secara jujur, tetapi tidak meniadakan langkah perlindungan yang masuk akal, terutama bagi orang dengan penyakit kronis, lansia, ibu hamil, bayi, anak, pekerja luar ruang, dan warga dengan pilihan perlindungan terbatas.

Perlindungan efektif dimulai dari sumber melalui pencegahan kebakaran dan pemulihan lanskap, lalu berlanjut melalui jaringan pemantauan, peringatan yang dapat ditindaklanjuti, ruang dengan udara yang lebih bersih, penyesuaian aktivitas dan kerja, serta layanan kesehatan yang siap. Kebijakan harus mempertimbangkan panas, ventilasi, pendapatan, transportasi, aksesibilitas, dan kesinambungan perawatan. Imbauan individual tidak cukup

bila warga tidak memiliki ruang aman, obat, informasi, atau pilihan untuk meninggalkan pekerjaan berisiko.

Agenda Indonesia mencakup pemantauan PM2.5 yang lebih merata, kalibrasi sensor, model emisi dan transportasi yang sesuai gambut tropis, surveilans kesehatan yang dapat dibandingkan, penelitian dampak lokal, serta evaluasi intervensi. Keberhasilan dinilai dari penurunan hari dan durasi paparan tinggi, komplikasi dan keterlambatan pertolongan, kontinuitas layanan, serta berkurangnya kesenjangan perlindungan. Dengan menghubungkan ilmu atmosfer, kesehatan masyarakat, layanan klinis, pengelolaan lanskap, dan tata kelola yang akuntabel, pengetahuan tentang PM2.5 dapat menjadi dasar keputusan yang melindungi kesehatan sebelum, selama, dan sesudah kebakaran.

Glossarium

Aerosol: Suspensi partikel padat atau tetesan cairan di udara.
AOD (Aerosol Optical Depth): Ukuran optik kolom aerosol di atmosfer yang dapat membantu memantau asap dari satelit, tetapi bukan pengukuran langsung PM2.5 permukaan.
Dosis terhirup: Jumlah polutan yang masuk ke saluran napas, dipengaruhi konsentrasi, waktu, dan laju pernapasan.
Eksaserbasi: Perburukan akut gejala penyakit kronis, misalnya asma atau PPOK.
Emisi: Pelepasan polutan ke atmosfer dari sumber, termasuk pembakaran biomassa dan gambut.
Fungsi paparan-respons: Hubungan kuantitatif antara tingkat paparan polutan dan perubahan risiko kesehatan.
Gambut: Tanah kaya bahan organik yang terbentuk dalam kondisi jenuh air dan dapat membara ketika mengering.
HEPA: Filter partikulat efisiensi tinggi yang digunakan pada perangkat sesuai desain dan spesifikasi.

Indeks kualitas udara: Skala komunikasi kondisi polusi; metode dan ambangnya dapat berbeda antarotoritas.
Inflamasi: Respons biologis tubuh terhadap iritan atau cedera yang dapat memengaruhi jaringan dan fungsi organ.
Karbon hitam: Partikulat kaya karbon hasil pembakaran tidak sempurna yang menyerap cahaya dan dapat menjadi komponen asap.
Konsentrasi ambien: Jumlah polutan per volume udara di lingkungan luar pada lokasi dan waktu tertentu.
Paparan: Kontak individu atau populasi dengan polutan pada konsentrasi dan durasi tertentu.
PM2.5: Partikel dengan diameter aerodinamis 2,5 mikrometer atau kurang yang dapat masuk jauh ke paru.
PM2.5 khusus kebakaran: Bagian PM2.5 yang diestimasi berasal dari emisi kebakaran, dibedakan dari sumber lain dengan metode tertentu.
PPOK: Penyakit paru obstruktif kronis yang membatasi aliran udara dan dapat memburuk akibat iritan.
Rasio dalam/luar ruang: Perbandingan konsentrasi polutan di dalam bangunan dengan konsentrasi di udara luar.
Ruang udara bersih: Ruang yang dikelola untuk mengurangi partikulat dalam ruangan dengan filtrasi dan pengendalian suhu yang sesuai.
Sensor berbiaya rendah: Alat pemantau polutan yang lebih terjangkau, umumnya memerlukan kalibrasi dan interpretasi khusus.
Stres oksidatif: Ketidakseimbangan molekul oksidatif dan sistem pertahanan antioksidan yang dapat memengaruhi sel.
Surveilans kesehatan: Pengumpulan dan analisis data kesehatan berkelanjutan untuk mendeteksi perubahan dan memandu tindakan.
Transpor atmosfer: Pergerakan asap dan polutan oleh angin, turbulensi, dan proses meteorologi lainnya.
WHO Air Quality Guidelines: Pedoman kualitas udara berbasis kesehatan yang mendukung pengelolaan risiko populasi, bukan jaminan bebas risiko individual.

Daftar Pustaka

Cascio, W. E. (2018). Wildland fire smoke and human health. Science of the Total Environment, 624, 586–595. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.086

Centers for Disease Control and Prevention. (2023, June 30). Wildfire smoke exposure poses threat to at-risk populations (Health Alert Network 00495). https://www.cdc.gov/han/2023/han00495.html

Cheong, K. H., Ngiam, N. J., Morgan, G. G., Pek, P. P., Tan, B. Y.-Q., Lai, J. W., Koh, J. M., Ong, M. E. H., & Ho, A. F. W. (2019). Acute health impacts of the Southeast Asian transboundary haze problem—A review. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(18), Article 3286. https://doi.org/10.3390/ijerph16183286

Cummings Melton, C., De Fries, C. M., Smith, R. M., & Reyes Mason, L. (2023). Wildfires and older adults: A scoping review of impacts, risks, and interventions. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(13), Article 6252. https://doi.org/10.3390/ijerph20136252

Fernandes, A. A. R., Panjaitan, R. B., & Solimun. (2019). The effect of community and company participation and implementation of good forest fire governance on the forest fire policy in Indonesia. Journal of Science and Technology Policy Management, 10(1), 102–115. https://doi.org/10.1108/JSTPM-05-2017-0017

Field, R. D., van der Werf, G. R., & Shen, S. S. P. (2009). Human amplification of drought-induced biomass burning in Indonesia since 1960. Nature Geoscience, 2, 185–188. https://doi.org/10.1038/ngeo443

Foo, D., Stewart, R., Heo, S., Dhamrait, G., Choi, H. M., Song, Y., & Bell, M. L. (2024). Wildfire smoke exposure during pregnancy and perinatal, obstetric, and early childhood health outcomes: A systematic review and meta-analysis. Environmental Research, 241, Article 117527. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117527

Gaveau, D. L. A., Salim, M. A., Hergoualc'h, K., Locatelli, B., Sloan, S., Wooster, M., Marlier, M. E., Molidena, E., Yaen, H., Deverell, E., Verchot, L., Murdiyarso, D., & Nasi, R. (2014). Major atmospheric emissions from peat fires in Southeast Asia during non-drought years: Evidence from the 2013 Sumatran fires. Scientific Reports, 4, Article 6112. https://doi.org/10.1038/srep06112

Gaveau, D. L. A., Sheil, D., Husnayaen, Salim, M. A., Arjasakusuma, S., Ancrenaz, M., Pacheco, P., & Meijaard, E. (2016). Rapid conversions and avoided deforestation: Examining four decades of industrial plantation expansion in Borneo. Scientific Reports, 6, Article 32017. https://doi.org/10.1038/srep32017

Gould, C. F., Heft-Neal, S., Johnson, M., Aguilera, J., Burke, M., & Nadeau, K. (2024). Health effects of wildfire smoke exposure. Annual Review of Medicine, 75, 277–292. https://doi.org/10.1146/annurev-med-052422-020909

Graham, A. M., Spracklen, D. V., McQuaid, J. B., Smith, T. E. L., Nurrahmawati, H., Ayona, D., Mulawarman, H., Adam, C., Papargyropoulou, E., Rigby, R., Padfield, R., & Choiruzzad, S. (2024). Updated smoke exposure estimate for Indonesian peatland fires using a network of low-cost PM2.5 sensors and a regional air quality model. GeoHealth, 8(11), e2024GH001125. https://doi.org/10.1029/2024GH001125

Grosvenor, M. J., Ardiyani, V., Wooster, M. J., Gillott, S., Green, D. C., Lestari, P., & Suri, W. (2024). Catastrophic impact of extreme 2019 Indonesian peatland fires on urban air quality and health. Communications Earth & Environment, 5, Article 649. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01813-w

Hein, L., Spadaro, J. V., Ostro, B., Hammer, M. S., Sumarga, E., Salmayenti, R., Boer, R., Tata, H. L., Atmoko, D., & Castañeda, J. P. (2022). The health impacts of Indonesian peatland fires. Environmental Health, 21, Article 62. https://doi.org/10.1186/s12940-022-00872-w

Hooijer, A., Page, S., Canadell, J. G., Silvius, M., Kwadijk, J., Wösten, H., & Jauhiainen, J. (2010). Current and future CO2 emissions from drained

peatlands in Southeast Asia. Biogeosciences, 7, 1505–1514. https://doi.org/10.5194/bg-7-1505-2010

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, Article 26886. https://doi.org/10.1038/srep26886

Kiely, L., Spracklen, D. V., Arnold, S. R., Papargyropoulou, E., Conibear, L., Wiedinmyer, C., Knote, C., & Adrianto, H. A. (2021). Assessing costs of Indonesian fires and the benefits of restoring peatland. Nature Communications, 12, Article 7044. https://doi.org/10.1038/s41467-021-27353-x

Kiely, L., Spracklen, D. V., Wiedinmyer, C., Conibear, L., Reddington, C. L., Arnold, S. R., Knote, C., Khan, M. F., Latif, M. T., Syaufina, L., & Adrianto, H. A. (2020). Air quality and health impacts of vegetation and peat fires in Equatorial Asia during 2004–2015. Environmental Research Letters, 15(9), Article 094054. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9a6c

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), Article 094023. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094023

Liu, J. C., Pereira, G., Uhl, S. A., Bravo, M. A., & Bell, M. L. (2015). A systematic review of the physical health impacts from non-occupational exposure to wildfire smoke. Environmental Research, 136, 120–132. https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.10.015

Marlier, M. E., DeFries, R. S., Kim, P. S., Koplitz, S. N., Jacob, D. J., Mickley, L. J., & Myers, S. S. (2015). Fire emissions and regional air quality impacts from

fires in oil palm, timber, and logging concessions in Indonesia. Environmental Research Letters, 10(8), Article 085005. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/085005

Marlier, M. E., Liu, T., Yu, K., Buonocore, J. J., Koplitz, S. N., Jacob, D. J., Mickley, L. J., & DeFries, R. S. (2019). Fires, smoke exposure, and public health: An integrative framework to maximize health benefits from peatland restoration. GeoHealth, 3(7), 178–189. https://doi.org/10.1029/2019GH000191

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, 61–65. https://doi.org/10.1038/nature01131

Purnomo, H., Puspitaloka, D., Okarda, B., Andrianto, A., Qomar, N., Sutikno, S., Muhammad, A., Basuki, I., Jalil, A., Yesi, Pandam Prasetyo, Tarsono, Zulkardi, Kusumadewi, S. D., Komarudin, H., Dermawan, A., & Brady, M. A. (2024). Community-based fire prevention and peatland restoration in Indonesia: A participatory action research approach. Environmental Development, 50, Article 100971. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2024.100971

Reid, C. E., Brauer, M., Johnston, F. H., Jerrett, M., Balmes, J. R., & Elliott, C. T. (2016). Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. Environmental Health Perspectives, 124(9), 1334–1343. https://doi.org/10.1289/ehp.1409277

Rizzo, L. V., & Rizzo, M. C. F. V. (2025). Wildfire smoke and health impacts: A narrative review. Jornal de Pediatria, 101(Suppl. 1), S56–S64. https://doi.org/10.1016/j.jped.2024.11.006

Rodríguez Vásquez, M. J., Benoist, A., Roda, J.-M., & Fortin, M. (2021). Estimating greenhouse gas emissions from peat combustion in wildfires on Indonesian peatlands, and their uncertainty. Global Biogeochemical Cycles, 35, e2019GB006218. https://doi.org/10.1029/2019GB006218

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/001130

Tacconi, L., Jotzo, F., & Grafton, R. Q. (2020). Causes of Indonesia's forest fires. World Development, 127, Article 104717. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104717

Turetsky, M. R., Benscoter, B., Page, S., Rein, G., van der Werf, G. R., & Watts, A. (2015). Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. Nature Geoscience, 8, 11–14. https://doi.org/10.1038/ngeo2325

Uda, S. K., Hein, L., & Sumarga, E. (2019). Assessing the health impacts of peatland fires: A case study for Central Kalimantan, Indonesia. Environmental Science and Pollution Research, 26(30), 31315–31327. https://doi.org/10.1007/s11356-019-06264-x

United Nations Environment Programme. (2019). A review of the science and policy on forest fires in Indonesia. https://www.unep.org/resources/report/review-science-and-policy-forest-fires-indonesia

World Bank. (2016). The cost of fire: An economic analysis of Indonesia's 2015 fire crisis. World Bank. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/23840

World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228