Pemanfaatan Satelit, AI, dan Internet of Things dalam Pemantauan Kebakaran Hutan



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

RudyCT Academic Series

Pemanfaatan Satelit, AI, dan Internet of Things dalam Pemantauan Kebakaran Hutan

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

IBM-ASMI | RudyCT Academic Series
2026

Abstrak

Pemantauan kebakaran hutan dan lahan di Indonesia menghadapi tantangan luas wilayah, keterpencilan, awan tropis, kebakaran bawah permukaan gambut, dan keterbatasan komunikasi di lapangan. Satelit, kecerdasan buatan (AI), dan Internet of Things (IoT) menawarkan kemampuan yang saling melengkapi: satelit mengamati wilayah luas dan mendeteksi anomali termal maupun perubahan tutupan; sensor IoT merekam kondisi mikro-lingkungan secara lebih dekat dan berulang; AI membantu menafsirkan citra, menggabungkan sumber data, menilai risiko, dan memprioritaskan verifikasi. Artikel ini menguraikan prinsip, jenis data, rancangan sistem, alur peringatan, validasi, keterbatasan, dan tata kelola penerapan teknologi tersebut. Pemantauan tidak disamakan dengan pemadaman atau pencegahan itu sendiri: informasi bernilai ketika sampai kepada petugas yang berwenang, diverifikasi, dan memicu tindakan yang sesuai. Kajian literatur dan dokumentasi teknis menunjukkan bahwa resolusi spasial, frekuensi lintasan, tutupan awan, latensi, kualitas sensor, konektivitas, serta kesalahan algoritma membentuk batas kemampuan sistem. Konteks Indonesia—terutama gambut, jaringan kanal, wilayah terpencil, variasi kapasitas daerah, dan kebutuhan melindungi data masyarakat—memerlukan desain yang adaptif dan dapat dipelihara. Naskah menyimpulkan bahwa

arsitektur berlapis yang menggabungkan penginderaan jauh, sensor lapangan, analitik AI, verifikasi manusia, dan tata kelola terbuka lebih andal daripada ketergantungan pada satu alat atau skor otomatis. Agenda pelaksanaan perlu dimulai dari masalah operasional yang jelas, uji coba bersama pengguna, standar data, anggaran pemeliharaan, serta evaluasi manfaat dan risiko secara berkala.

Kata Kunci
pemantauan kebakaran; satelit; penginderaan jauh; kecerdasan buatan; Internet of Things; sensor; sistem peringatan dini; gambut; Indonesia; tata kelola data.

1. Pendahuluan: Dari deteksi kebakaran menuju keputusan lapangan

Kebakaran hutan dan lahan adalah proses yang bergerak dalam ruang dan waktu. Api dapat bermula kecil, berada di kawasan yang sulit dijangkau, berkembang selama beberapa jam, lalu mengubah tutupan lahan dan kualitas udara melampaui batas administrasi tempat titik awal terdeteksi. Pada lanskap gambut, pembakaran dapat merambat di bawah permukaan dan sulit diamati melalui penglihatan langsung. Keadaan ini menempatkan pemantauan sebagai unsur penting dalam pencegahan, deteksi dini, respons, penilaian kerusakan, dan pemulihan.

Kemajuan penginderaan jauh menyediakan pengamatan berkala wilayah luas; sensor IoT dapat merekam kondisi setempat secara kontinu; dan AI membantu memproses citra serta data sensor dalam jumlah besar. Masing-masing memiliki sifat berbeda. Satelit menawarkan cakupan, tetapi tidak selalu mengamati lokasi pada saat api mulai menyala. Sensor lokal memberi data dekat waktu nyata, tetapi hanya pada titik tertentu dan memerlukan daya serta komunikasi. AI mengotomatisasi pola, tetapi memerlukan data pelatihan yang representatif dan validasi di kondisi penggunaan. Kombinasi menjadi berguna ketika setiap sumber dipakai untuk pertanyaan yang sesuai.

Pemantauan perlu menjawab pertanyaan operasional: di mana bahaya meningkat, apakah terdapat anomali termal atau sinyal asap, seberapa yakin deteksi tersebut, siapa yang dapat memverifikasi, bagaimana akses petugas, dan tindakan apa yang harus menyusul. Tanpa alur ini, peta hotspot, dashboard, dan model prediksi hanya menambah informasi di layar. Nilai teknologi diukur dari pengurangan waktu dari sinyal ke verifikasi dan tindakan, perbaikan cakupan, serta mutu keputusan yang dihasilkan.

Artikel ini membahas pemanfaatan satelit, AI, dan IoT dalam satu sistem pemantauan yang mencakup kondisi prakebakaran, api aktif, asap dan sebaran risiko, serta dampak pascakebakaran. Pembahasan memasukkan sensor MODIS dan VIIRS, Landsat, Sentinel, radar SAR, kamera, sensor temperatur, kelembapan, angin, asap, dan kelembapan tanah; serta teknik pemrosesan citra, pembelajaran mesin, fusi data, geospasial, edge computing, dan sistem peringatan. Unsur-unsur tersebut diterangkan bersama kelebihan, keterbatasan, dan risiko penerapannya.

Konteks Indonesia memengaruhi desain. Wilayah kepulauan, tutupan awan, hutan dan gambut luas, jaringan telekomunikasi yang tidak merata, listrik terbatas, keragaman ekosistem, dan variasi kemampuan pemerintah daerah menuntut sistem yang tahan gangguan dan dapat dirawat. Data perlu dikelola dengan transparansi, perlindungan privasi, pembagian peran, serta interoperabilitas. Argumen utama naskah ialah bahwa arsitektur berlapis dengan verifikasi manusia, prosedur operasi, pendanaan pemeliharaan, dan pembelajaran antarmusim lebih dapat diandalkan daripada satu teknologi yang dijanjikan mampu mendeteksi semuanya.

2. Kerangka konseptual pemantauan berlapis

Kerangka pemantauan dapat dibangun sebagai rantai lima tahap: mengamati kondisi, mendeteksi pola, menilai keyakinan, memverifikasi sinyal, lalu menghubungkannya dengan tindakan. Pada tahap observasi, satelit, sensor darat, stasiun cuaca, kamera, dan laporan warga mengukur hal yang berbeda.

Deteksi menandai perubahan atau anomali yang patut diperiksa. Penilaian keyakinan menggabungkan mutu sensor, kondisi langit, riwayat lokasi, dan sumber independen. Verifikasi menilai apakah terdapat api, asap, atau penyebab lain. Tindakan dapat berupa pemeriksaan lapangan, penambahan patroli, koordinasi pemadaman, peringatan, atau pembaruan peta.

Pemantauan juga mengikuti waktu siklus kebakaran. Sebelum kejadian, data historis, tutupan lahan, bahan bakar, kelembapan, curah hujan, dan aktivitas manusia membantu memetakan kondisi bahaya. Saat terjadi api, deteksi termal, kamera, sensor gas atau asap, dan laporan lapangan memberikan sinyal. Setelah api, citra optik dan radar membantu memetakan area terbakar, tingkat perubahan vegetasi, kerusakan aset, dan kemajuan pemulihan. Data yang relevan pada satu tahap belum tentu cocok untuk tahap lain; indeks vegetasi dapat mendukung pemetaan bekas bakar namun tidak menggantikan deteksi termal waktu nyata.

Pembedaan konsep mencegah klaim berlebihan. Anomali termal adalah indikasi suhu permukaan yang tidak biasa; hotspot merupakan keluaran algoritma yang menandai kemungkinan sumber panas; active fire product menampilkan deteksi kebakaran dengan tingkat keyakinan tertentu. Ketiganya bukan putusan final bahwa kebakaran telah terkonfirmasi atau bukti siapa penyebabnya. Peta risiko memprediksi peluang relatif, bukan lokasi api yang pasti. Peta bekas terbakar menunjukkan perubahan yang konsisten dengan pembakaran setelah kejadian dan tidak selalu menggambarkan perimeter pada saat api berlangsung.

Sistem pengamatan dapat digambarkan sebagai sistem sosio-teknis. Sensor dan algoritma bergantung pada jaringan komunikasi, perangkat lunak, prosedur kerja, kompetensi petugas, tata kelola, dan legitimasi publik. Kegagalan bukan hanya kegagalan alat: data tidak dibaca, peringatan tidak sampai, laporan tidak diverifikasi, atau tanggung jawab tidak jelas juga dapat memutus rantai. Karena itu, desain harus memasukkan operator, masyarakat

lokal, pemerintah daerah, pemadam, lembaga riset, serta pemilik sistem sejak awal.

Kerangka ini memberi dasar bagi ukuran kinerja. Cakupan sensor mengukur area yang dapat diamati; latensi mengukur waktu sejak pengamatan hingga informasi tersedia; precision dan recall menilai mutu deteksi; waktu verifikasi mengukur proses lapangan; dan waktu respons mengukur tindak lanjut. Indikator akhir dapat mencakup pengurangan luasan terbakar atau kerugian, tetapi hasil tersebut dipengaruhi cuaca, bahan bakar, dan tindakan manusia. Evaluasi harus menghubungkan setiap indikator ke tahap rantai yang memang dapat dipengaruhi sistem.

3. Lanskap Indonesia dan tantangan observasi kebakaran

Lanskap Indonesia membentang dari hutan dataran rendah, rawa gambut, mangrove, savana, lahan pertanian, perkebunan, hingga hutan pegunungan. Variasi tutupan, topografi, cuaca, dan penggunaan lahan memengaruhi sinyal pengamatan. Di kawasan gambut, api dapat membara di bawah permukaan dan menghasilkan asap berkelanjutan; di savana, api bergerak cepat dengan jejak vegetasi yang berbeda; pada kawasan perkebunan, barisan tanaman dan jalan dapat membentuk pola yang dikenali citra tetapi juga menimbulkan kebingungan klasifikasi.

Awan, kabut, asap, bayangan, dan sudut pengamatan memengaruhi citra optik. Musim hujan dapat mengurangi kesempatan memperoleh citra tanpa awan justru ketika kondisi vegetasi berubah cepat. Topografi memberi bayangan serta memengaruhi keterlihatan kamera dan jangkauan radio. Permukiman yang jarang dan jaringan jalan terbatas meningkatkan waktu verifikasi lapangan. Keterpencilan karenanya bukan hanya isu akses operasi, melainkan juga persoalan desain pemantauan dan pilihan komunikasi.

Sistem satelit berbeda dalam resolusi spasial, spektral, temporal, lebar sapuan, latensi, dan tujuan produk. Sensor termal resolusi menengah seperti MODIS dan VIIRS lazim dipakai untuk deteksi active fire di area luas. Sentinel-

2 menyediakan citra multispektral resolusi lebih tinggi untuk kondisi vegetasi dan pemetaan bekas terbakar, tetapi lintasan dan awan membatasi observasi operasional saat api aktif (European Space Agency, n.d.-b). Sentinel-1 menggunakan radar sintetis apertur yang dapat mencitrakan permukaan pada siang atau malam dan menembus awan, namun menafsirkan perubahan backscatter untuk kebakaran memerlukan pemahaman kondisi permukaan dan metode khusus (European Space Agency, n.d.-a).

Satelit geostasioner menawarkan pengamatan lebih sering pada kawasan tetap dengan resolusi spasial lebih kasar; satelit polar memberi cakupan global dan detail tertentu, tetapi lintasannya lebih jarang. Pengamatan frekuensi tinggi dapat membantu mengamati perkembangan api, sedangkan resolusi lebih tinggi berguna untuk memeriksa skala kecil dan batas lokasi. Keduanya merupakan pertukaran teknis, bukan keunggulan mutlak salah satu pilihan. Sistem nasional sebaiknya menggabungkan produk yang memang tersedia, memperjelas waktu akuisisi, dan menandai celah observasi.

Kebakaran tidak selalu terlihat oleh satelit. Api kecil dapat berada di bawah ukuran piksel, tertutup awan tebal, tertutupi kanopi, atau berlangsung di antara waktu lintasan. Sebaliknya, permukaan panas, kilang, pembangkit, flare gas, atau pantulan matahari dapat menghasilkan sinyal yang perlu diperiksa. Satelit mengamati radiasi dan perubahan permukaan; ia tidak secara langsung menilai status kepemilikan lahan, niat pelaku, keselamatan petugas, atau tingkat risiko masyarakat.

Sifat ruang dan waktu Indonesia mengharuskan pemantauan multi-sensor. Peta risiko, data hidrologi gambut, cuaca, citra satelit, titik panas, kondisi sensor IoT, dan laporan lapangan dapat disatukan untuk prioritas verifikasi. Integrasi ini perlu memakai definisi, koordinat, zona waktu, resolusi, dan metadata yang konsisten. Tanpa itu, visualisasi gabungan berisiko terlihat padu secara grafis namun membandingkan data dengan arti berbeda.

4. Satelit dan penginderaan jauh untuk pemantauan kebakaran

Data satelit menyediakan cara untuk mengamati lanskap luas tanpa menempatkan petugas pada setiap lokasi. Produk active fire dari MODIS dan VIIRS menggunakan karakteristik termal untuk menandai anomali panas yang konsisten dengan api. VIIRS 375 meter dirancang untuk deteksi yang lebih rinci dibanding produk active fire resolusi lebih kasar dan dapat membantu mengidentifikasi kebakaran berukuran lebih kecil, meskipun tetap dibatasi ukuran piksel dan kondisi observasi (Schroeder et al., 2014). NASA FIRMS menyajikan deteksi active fire near-real-time dari MODIS dan VIIRS beserta akses peta, data, dan layanan (National Aeronautics and Space Administration, n.d.).

Resolusi dan latensi tidak boleh dicampuradukkan. Data VIIRS 375 m merujuk pada ukuran nominal pengamatan spasial, bukan jaminan bahwa api sekecil 375 meter akan terdeteksi. FIRMS melaporkan data global near-real-time dalam beberapa jam setelah observasi satelit; jeda itu mencakup akuisisi, pemrosesan, dan distribusi, dan dapat berbeda menurut produk serta kondisi. Untuk api yang berkembang cepat, beberapa jam dapat menjadi waktu penting, sehingga produk satelit perlu dilengkapi sensor darat, pengamatan cuaca, dan laporan petugas.

Sensor optik Sentinel-2 memiliki 13 pita spektral, dengan resolusi spasial 10, 20, dan 60 meter serta kunjungan ulang nominal lima hari untuk konstelasi. Ia berguna untuk analisis tutupan lahan, perubahan vegetasi, bahan bakar, dan bekas terbakar. Namun, citra optik tidak selalu tersedia pada waktu kebakaran karena awan dan asap. Sentinel-1 SAR menyediakan observasi radar siang dan malam yang dapat menembus awan, dan dapat membantu pemetaan perubahan serta bekas terbakar; speckle, kelembapan tanah, struktur vegetasi, dan perubahan penggunaan lahan memerlukan interpretasi yang hati-hati.

Pemetaan bekas terbakar membandingkan sinyal sebelum dan sesudah kejadian, menggunakan indeks spektral seperti Normalized Burn Ratio dan

klasifikasi citra, atau menggabungkan data optik dan radar. Produk bekas bakar tidak sama dengan peta titik panas: yang pertama menunjukkan jejak setelah peristiwa, yang kedua menandai deteksi termal pada waktu tertentu. Produk berbasis satelit dapat mendukung verifikasi, inventarisasi luas, perencanaan restorasi, dan evaluasi, tetapi perlu dibandingkan dengan citra resolusi lebih tinggi atau survei lapangan pada wilayah prioritas.

Fusi beberapa sensor memperkaya konteks. Data VIIRS dapat memicu peringatan, Sentinel-2 menilai perubahan tutupan, Sentinel-1 memberi observasi ketika awan menghalangi optik, data cuaca memberi kondisi angin dan kekeringan, sedangkan kamera atau IoT memeriksa skala lokal. Ghali dan Akhloufi (2023) meninjau metode deep learning untuk deteksi, pemetaan, dan prediksi kebakaran berbasis data satelit dan menekankan variasi tugas, dataset, dan keterbatasan generalisasi.

Penginderaan jauh yang bermanfaat memerlukan dokumentasi. Setiap layer perlu mencatat sensor, tanggal dan jam pengamatan, proyeksi, resolusi, tingkat pemrosesan, ambang keyakinan, status awan, serta sumber data. Operator harus dapat melihat data asli atau metadata ketika model menghasilkan sinyal yang tidak biasa. Produk turunan perlu dipertahankan bersama versi algoritma agar perubahan hasil dari waktu ke waktu dapat dijelaskan dan direproduksi.

5. Internet of Things dan sensor lapangan

Internet of Things menghubungkan sensor, perangkat komputasi kecil, gateway, jaringan komunikasi, dan aplikasi analisis agar data lapangan dapat dikirim dan digunakan secara berkala. Pada sistem pemantauan kebakaran, node dapat merekam suhu, kelembapan relatif, tekanan, kecepatan dan arah angin, konsentrasi partikulat atau gas, kadar air bahan bakar, kelembapan tanah, serta gambar termal atau visual. Tidak semua node perlu memuat semua sensor; pilihan ditentukan oleh risiko, biaya, daya, kondisi lingkungan, dan kebutuhan keputusan.

Sensor suhu dan kelembapan membantu menilai kondisi mikroklimat, tetapi tidak dengan sendirinya mendeteksi api. Sensor gas atau partikel dapat mengenali perubahan terkait asap, tetapi dapat bereaksi terhadap sumber lain seperti kendaraan, pembakaran domestik, debu, atau kegiatan industri. Sensor kelembapan tanah dan bahan bakar memberi informasi kekeringan pada skala titik; pengukuran tersebut tidak selalu mewakili seluruh blok lahan. Kombinasi beberapa parameter dan lokasi pembanding mengurangi risiko menyimpulkan kebakaran dari satu nilai.

Node IoT memerlukan desain untuk lingkungan luar: pelindung hujan dan panas, perlindungan korosi, rumah sensor yang tidak menghambat aliran udara, dudukan aman, dan akses untuk perawatan. Sensor yang terpapar panas ekstrem atau asap padat dapat mengalami penyimpangan, tertutup partikel, atau gagal. Kualitas data harus dikaitkan dengan status baterai, kalibrasi, nomor seri, waktu terakhir berkomunikasi, dan pemeriksaan teknis.

Komunikasi dapat menggunakan Wi-Fi atau seluler dekat fasilitas, radio mesh atau LoRaWAN untuk jarak tertentu, dan komunikasi satelit pada lokasi tanpa infrastruktur. Pilihan konektivitas mempertimbangkan jangkauan, kapasitas data, konsumsi daya, topografi, biaya langganan, spektrum, dan kebutuhan latensi. Kamera mengirim data lebih besar daripada sensor temperatur, sehingga kompresi, pengiriman saat ada pemicu, dan edge processing dapat membantu mengurangi beban jaringan.

Ketersediaan jaringan tidak boleh diasumsikan. Node perlu menyimpan data lokal ketika sinyal hilang dan mengirimkannya ketika konektivitas pulih. Gateway dapat menandai waktu hilang, keterlambatan, paket duplikat, atau konflik jam. Sistem tetap harus memiliki kanal komunikasi alternatif untuk peringatan darurat: radio petugas, telepon satelit, radio komunitas, atau prosedur pelaporan manual. IoT yang tidak memiliki rencana operasi saat offline hanyalah sistem demonstrasi yang rapuh.

Penempatan sensor memengaruhi deteksi. Jaringan harus memperhatikan cakupan, jarak, elevasi, vegetasi yang menghalangi, arah angin, sumber

gangguan, dan akses untuk pemeliharaan. Azevedo et al. (2021) memodelkan alokasi sensor dengan mempertimbangkan keterbatasan jangkauan dan gangguan kepadatan hutan. Kizilkaya et al. (2022) menguji rancangan hierarkis yang menggabungkan sensor multimedia dan scalar serta pemrosesan edge untuk menekan transmisi data visual dan beban energi. Dalam kenyataan Indonesia, optimasi matematis perlu ditambah survei radio, partisipasi petugas, keselamatan akses, hak atas lahan, dan pembiayaan pemeliharaan.

IoT dapat mempercepat pengamatan lokal, tetapi bukan pengganti satelit. Sensor memberikan keterincian titik dan frekuensi tinggi, sementara satelit memberikan konteks luas. Peta instalasi, status operasi, dan tingkat keterwakilan perlu ditampilkan agar pengguna memahami area yang benar-benar diamati dan area yang hanya diinterpolasi.

6. Sinyal lingkungan dan pemicu kejadian

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. AI untuk deteksi, prediksi risiko, dan dukungan keputusan

AI mencakup metode yang membantu komputer mengenali pola, membuat klasifikasi, memperkirakan besaran, atau memberi rekomendasi berdasarkan data. Dalam pemantauan kebakaran, tugasnya dapat berupa mendeteksi anomali termal pada citra, membedakan awan dari asap, mengklasifikasikan lahan terbakar, memprediksi tingkat bahaya, memperkirakan penyebaran api, menggabungkan sensor, dan memprioritaskan patroli. Setiap tugas membutuhkan label, masukan, skala waktu, dan kriteria keberhasilan yang berbeda.

Model klasifikasi citra dapat menggunakan jaringan saraf konvolusional atau transformer untuk mengenali pola api, asap, bekas bakar, dan tutupan lahan. Model deret waktu dapat memanfaatkan cuaca, indeks kekeringan,

kelembapan, dan riwayat kebakaran. Metode anomali dapat menandai perubahan yang tidak lazim pada sensor. Model graf dan optimasi dapat membantu memilih posisi sensor atau jalur pemeriksaan. Pilihan model sebaiknya mengikuti kebutuhan operasional dan ukuran data, bukan kebaruan algoritma semata.

Kumpulan data pelatihan menentukan apa yang dipelajari model. Jika citra didominasi kebakaran besar di wilayah beriklim sedang, model mungkin tidak mengenali api kecil di lahan gambut tropis atau membingungkan kabut, awan, dan asap. Label buatan manusia juga dapat berbeda antarpenilai. Dataset harus mencakup variasi musim, sensor, tingkat tutupan awan, skala kebakaran, dan kondisi negatif yang mirip api; dokumentasi asal data, hak penggunaan, ketidakseimbangan kelas, dan prosedur anotasi diperlukan.

Model perlu diuji pada data yang tidak dipakai untuk pelatihan, termasuk pemisahan berdasarkan lokasi dan tahun agar kebocoran spasial atau temporal dapat dihindari. Akurasi keseluruhan dapat menutupi kegagalan mendeteksi kelas api yang jarang. Evaluasi perlu melaporkan precision, recall, false alarm rate, waktu deteksi, kalibrasi probabilitas, dan kinerja menurut ekosistem. Untuk operasi lapangan, biaya false negative—api tidak terdeteksi—dan false positive—petugas dikirim tanpa kebakaran—berbeda; ambang perlu ditetapkan bersama pengguna.

Prakiraan risiko tidak sama dengan prediksi lokasi api. Peta risiko menggabungkan kondisi bahan bakar, cuaca, topografi, akses, sejarah kebakaran, dan penggunaan lahan untuk memperkirakan peluang relatif atau tingkat kewaspadaan. Model penyebaran memerlukan posisi awal, angin, bahan bakar, kemiringan, dan kelembapan. Tanpa data awal yang baik, model canggih tetap menghasilkan batasan. Hasil harus berupa skenario dan tingkat keyakinan, bukan kepastian tentang lokasi atau waktu kejadian.

Model yang dapat dijelaskan membantu operator memahami faktor yang mendorong peringatan, namun penjelasan fitur tidak membuktikan kausalitas. Antarmuka harus menampilkan alasan, sumber data, kualitas

masukan, pembanding, serta pilihan verifikasi. Petugas perlu dapat menolak, mengoreksi, atau memberi konteks pada keluaran. Catatan tersebut menjadi bahan evaluasi dan pembelajaran, bukan sekadar log teknis.

AI paling berguna sebagai penguat kapasitas manusia: menyaring jutaan piksel, memberi urutan prioritas, dan mengenali pola yang sulit dilihat secara manual. Keputusan yang memiliki konsekuensi hukum, mengerahkan sumber daya besar, atau menyangkut keselamatan memerlukan pengawasan manusia, prosedur eskalasi, dan tanggung jawab institusional. Sistem harus tetap berfungsi secara aman ketika model, jaringan, atau layanan cloud tidak tersedia.

8. Apa yang harus dipantau sebelum, saat, dan sesudah api

Pemantauan sebelum kebakaran mengamati kondisi yang mengubah kemungkinan penyalaan dan penyebaran. Parameter dapat mencakup curah hujan, suhu, kelembapan udara dan tanah, muka air gambut, kelembapan vegetasi, tutupan lahan, akses jalan atau kanal, serta riwayat api. Data harus digabungkan pada rentang waktu yang relevan: prakiraan musiman mendukung alokasi anggaran, prakiraan beberapa hari membantu penjadwalan patroli, sedangkan sensor lokal memberi indikasi kondisi saat ini.

Pemantauan api aktif memerlukan deteksi cepat, lokasi yang dapat digunakan petugas, indikasi ukuran atau intensitas, arah angin, akses sumber air, jalur masuk, dan status laporan. Satelit membantu menemukan area prioritas; sensor atau kamera memeriksa kondisi lokal; petugas memberikan informasi operasional yang tidak dapat dibaca dari citra. Informasi harus memberi waktu pengamatan, ketidakpastian, dan instruksi tindak lanjut.

Selama kejadian, perubahan bahaya dan status sumber daya perlu dilacak. Cuaca, angin, kelembapan, kondisi bahan bakar, dan muka air dapat memengaruhi penyebaran. Data peta jalan, kanal, jembatan, akses komunikasi, fasilitas kesehatan, dan posisi tim perlu diperbarui secara aman.

Peta operasi harus membedakan laporan terverifikasi dari dugaan dan menunjukkan waktu pembaruan agar keputusan tidak bertumpu pada informasi kedaluwarsa.

Pemantauan asap melengkapi deteksi api. Arah angin, aerosol satelit, sensor PM2.5, dan pengamatan permukaan dapat membantu memperkirakan wilayah terdampak. Konsentrasi dari model bukan pengukuran langsung; sensor udara lokal perlu kalibrasi. Informasi ini dapat mendukung pengumuman sekolah, perlindungan pekerja, serta layanan kesehatan, tetapi memerlukan protokol dengan dinas terkait. Sistem kebakaran yang hanya menampilkan hotspot dapat terlambat menangkap kebutuhan masyarakat di hilir.

Sesudah kebakaran, citra optik dan radar membantu mengidentifikasi area terbakar, kerusakan vegetasi, perubahan drainase, dan kebutuhan restorasi. Pengamatan berulang dapat menilai regenerasi, erosi, kekeruhan air, dan keberhasilan pemulihan hidrologi. Penilaian lapangan diperlukan untuk membedakan kebakaran, panen, perubahan musiman, dan pembukaan lahan. Arsip pascakebakaran juga dapat menjadi data pelatihan dan evaluasi respons.

Informasi baru bernilai ketika memiliki pengguna dan keputusan yang jelas. Dinas kehutanan mungkin memerlukan batas area terbakar; pemadam memerlukan lokasi serta akses; dinas kesehatan membutuhkan arah asap; pemerintah desa memerlukan peringatan yang dipahami; penegak hukum memerlukan data yang dapat diuji dan memiliki rantai penguasaan. Produk yang sama tidak selalu memenuhi semua kebutuhan, sehingga sistem perlu menyediakan tampilan yang sesuai peran.

Masyarakat menerima manfaat ketika informasi mengurangi keterlambatan, membantu menghindari paparan, melindungi sumber air dan mata pencaharian, serta mendukung pemulihan. Karena itu, keberhasilan pemantauan perlu dinilai bersama penduduk di wilayah yang dipantau.

Mereka dapat mengungkap lokasi blind spot, pola api lokal, sinyal asap yang sering salah ditafsirkan, dan kondisi akses yang tidak muncul pada peta.

9. Nilai informasi bagi perlindungan masyarakat dan ekosistem

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. Pelajaran dari episode kebakaran Indonesia

Pengalaman kebakaran besar di Indonesia memberi contoh bagaimana pengamatan satelit dapat menyusun gambaran luas pada saat akses lapangan terbatas. Pada episode 1997, citra satelit dan pengukuran lapangan membantu memetakan area terbakar dan mendokumentasikan pembakaran gambut. Pada 2015, produk MODIS dan VIIRS, aerosol satelit, data

meteorologi, model dispersi, dan pengamatan permukaan digunakan bersama untuk menilai luas kejadian dan kabut asap. Karya Koplitz et al. (2016) menunjukkan kerangka untuk menghubungkan emisi kebakaran, kualitas udara, dan paparan penduduk lintas kawasan.

Episode 2019 kembali menunjukkan peran pengamatan multi-temporal. Citra satelit mendukung penentuan pola kebakaran serta perubahan tutupan, sedangkan data cuaca dan pemodelan memberi konteks kekeringan serta transportasi asap. Tidak ada satu citra yang menjawab semua hal: pengamatan optik dapat terganggu awan dan asap, sementara deteksi termal menangkap waktu lintasan dan resolusi tertentu. Penggabungan beberapa sumber meningkatkan konteks tetapi juga memerlukan pencatatan waktu dan metodologi yang konsisten.

Kajian ilmiah atas kejadian historis membantu membangun baseline dan menilai apakah pola baru berbeda. Riwayat hotspot, luas terbakar, jenis tutupan, curah hujan, muka air gambut, dan tindakan respons dapat digunakan untuk menyusun peta prioritas. Data historis tidak selalu lengkap: metode satelit berubah, sensor berganti, dan kawasan tidak diamati dengan kualitas seragam. Peneliti perlu menghindari tren palsu akibat perbedaan instrumen atau ambang deteksi.

Penelitian Kim et al. dan Marlier et al. tentang kebakaran serta kualitas udara Equatorial Asia memperlihatkan kegunaan menggabungkan inventaris emisi dan pemodelan atmosfer untuk memahami dampak di hilir. Studi ini mengingatkan bahwa peta api tidak identik dengan peta paparan asap. Pemantauan operasional dapat menghubungkan deteksi aktif dengan sensor kualitas udara dan informasi kesehatan, dengan batas jelas mengenai apa yang terukur dan apa yang diperkirakan.

Peristiwa 2015 juga menjadi pelajaran tentang pentingnya menyampaikan tingkat keyakinan. Titik panas merupakan sinyal untuk penyelidikan; titik yang berulang dapat menunjukkan kejadian berlanjut; citra pascakebakaran dapat membantu menghitung luas; bukti lapangan mendukung klasifikasi dan

atribusi. Data spasial dapat mengarahkan verifikasi, tetapi lokasi kejadian pada konsesi atau wilayah tertentu bukan dengan sendirinya bukti tanggung jawab pelaku. Keputusan hukum memerlukan bukti yang memenuhi standar pembuktian dan proses yang adil.

Arsip kejadian hendaknya menyimpan data mentah, produk olahan, versi algoritma, catatan koreksi, laporan lapangan, dan keputusan yang diambil. Tanpa catatan ini, pemerintah sulit mengukur apakah deteksi lebih cepat, false alarm berkurang, atau koordinasi membaik. Arsip yang terstandar membuat pembelajaran antarmusim mungkin dilakukan dan membantu lembaga baru memahami keputusan sebelumnya.

Pelajaran pokok dari kasus Indonesia ialah menggabungkan teknologi dengan prosedur. Satelit membantu menemukan, IoT memberi konteks dekat, AI mengurutkan prioritas, dan petugas memverifikasi. Untuk wilayah gambut dan pulau terpencil, sistem tersebut memerlukan peta risiko khusus, komunikasi cadangan, dan anggaran pemeliharaan. Setiap evaluasi harus menilai apakah data benar-benar mengubah tindakan dan mengurangi waktu penanganan.

11. Data untuk pencegahan dan 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 operasional dan respons berbasis data

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. Pemantauan pascakebakaran dan pemulihan

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 sistem pemantauan lintas lembaga

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. Pembiayaan siklus hidup dan akuntabilitas teknologi

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. Kompetensi, pendidikan, dan literasi data geospasial

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. Kebutuhan pemantauan menurut karakter wilayah

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. Arsip kejadian, pembelajaran, dan kalibrasi historis

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 operasi terpadu deteksi sampai tindakan

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. Kualitas, interoperabilitas, dan keterbatasan data

Data geospasial harus menyertakan metadata minimum: sumber dan sensor, waktu pengamatan dan zona waktu, resolusi, proyeksi koordinat, metode pemrosesan, kualitas, ketidakpastian, lisensi, dan versi. Informasi ini menjaga agar pengguna tidak membandingkan produk berbeda seolah-olah berasal dari pengukuran setara. Titik panas, luasan terbakar, anomali termal, indeks vegetasi, sensor cuaca, dan laporan lapangan memiliki unit analisis dan batas yang berbeda.

Kesalahan deteksi mencakup omission—api tidak terdeteksi—dan commission—sinyal yang bukan kebakaran masuk sebagai deteksi. Ukuran api, suhu, awan, asap, sudut pandang, latar permukaan, tutupan vegetasi, dan waktu lintasan memengaruhi kesalahan tersebut. Validasi perlu menggunakan referensi independen seperti observasi lapangan, kamera, citra resolusi lebih tinggi, atau catatan resmi, dengan mengakui bahwa referensi itu juga memiliki kesalahan dan jeda waktu.

Model AI perlu mencatat versi, data pelatihan, label, pembagian data, ambang keputusan, metrik, dan kondisi penggunaan. Kinerja rata-rata dapat menyembunyikan kegagalan pada gambut, mangrove, atau musim hujan. Validasi lintas provinsi, tahun, dan sensor penting sebelum penerapan skala luas. Pembaruan model perlu melalui pengujian dan dokumentasi, bukan langsung mengganti keluaran di sistem operasional tanpa memberi tahu pengguna.

Sensor lapangan membutuhkan quality control: kalibrasi, kolokasi, deteksi drift, penanganan data hilang, sinkronisasi jam, pemeriksaan baterai, dan penggantian unit. Kegagalan jaringan tidak boleh direpresentasikan sebagai

keadaan aman. Dashboard harus membedakan nilai nol dari data kosong, memberi tanda waktu terakhir, serta menyatakan apakah nilai diobservasi, diinterpolasi, atau diprediksi.

Interoperabilitas diperlukan antara lembaga pusat dan daerah. Standar bersama dapat mengatur format waktu, koordinat, kode wilayah, definisi jenis kejadian, identitas unik laporan, protokol API, dan skema akses. Prinsip FAIR—dapat ditemukan, diakses, interoperabel, dan dapat digunakan kembali—dapat diterapkan sambil menjaga keamanan, hak, dan konteks. Sistem harus mendukung ekspor dan migrasi data supaya pemerintah tidak terkunci pada satu vendor.

Ketidakpastian tidak selalu dapat dihilangkan; ia harus disajikan. Probabilitas, rentang, kelas confidence, dan catatan keterbatasan membantu operator menyusun prioritas. Satu titik model dengan presisi koordinat tinggi bukan berarti kepastian lokasi api juga tinggi. Visualisasi perlu menghindari kesan akurat berlebihan dengan menampilkan zona kemungkinan dan skala peta yang sesuai.

Keterbukaan data mendorong penelitian dan pengawasan, tetapi tidak semua informasi dapat dipublikasikan tanpa batas. Lokasi sensitif, identitas pelapor, jalur patroli, data fasilitas, serta informasi perusahaan tertentu dapat menimbulkan risiko. Tata kelola harus menetapkan kelas data publik, terbatas, dan rahasia; dasar akses; retensi; serta mekanisme permintaan koreksi. Audit akses menjaga transparansi dan keamanan.

Kepercayaan publik terbentuk ketika data dapat diperiksa, keterbatasan dijelaskan, dan kesalahan dikoreksi. Jika warga melaporkan asap atau api namun tidak menerima tindak lanjut, mereka dapat berhenti berpartisipasi. Sistem umpan balik perlu memberi nomor laporan, status verifikasi, dan penutupan yang dapat dijelaskan. Pengguna masyarakat perlu ikut menilai kinerja serta dampak dari data yang mereka sumbangkan.

21. Etika, privasi, kepemilikan, 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 pusat operasi dan jaringan respons lokal

Pusat operasi pemantauan menghubungkan deteksi, verifikasi, dan pengambilan keputusan. Struktur minimum mencakup operator yang menerima sinyal, analis yang mengecek sumber dan konteks, petugas lapangan yang memverifikasi, pejabat yang menetapkan tindakan, serta komunikator yang menyebarkan informasi sesuai audiens. Fungsi ini dapat berada di posko BPBD, dinas kehutanan, pusat kendali daerah, atau unit gabungan; yang penting adalah peran, jam operasi, kewenangan, dan jalur eskalasi yang disepakati sebelum kebakaran.

Peta aset operasi dapat memuat lokasi sensor dan gateway, jaringan komunikasi, jalan dan jembatan, kanal, sumber air, pos pemadam, fasilitas kesehatan, permukiman, kawasan konservasi, dan batas tanggung jawab. Setiap layer harus memiliki waktu pembaruan, sumber, dan pemilik. Posisi personel dan informasi sensitif tidak ditampilkan secara publik; akses internal mengikuti mandat dan kebutuhan keselamatan.

Jaringan respons lokal menghubungkan desa, kelompok masyarakat, petugas pemadam, perusahaan, pemerintah kabupaten, dan pusat nasional. Mekanisme ini memungkinkan laporan masyarakat dikonfirmasi dan diberi status, serta hasil pemeriksaan dikirim kembali ke pusat. Ketika internet tidak tersedia, radio, peta cetak, telepon, dan pencatatan manual tetap menjadi bagian dari protokol. Data offline disinkronkan setelah jaringan kembali tanpa kehilangan waktu observasi.

Sistem peringatan memerlukan tingkat urgensi yang jelas. Sinyal otomatis yang belum diperiksa dapat memicu pengecekan jarak jauh; temuan yang konsisten dengan api dapat memicu pengiriman tim; api terkonfirmasi dengan risiko tinggi dapat meningkatkan status komando. Ambang harus ditetapkan berdasarkan biaya salah deteksi, kapasitas tim, dan konsekuensi keselamatan. Sistem tidak boleh mengirim banyak alarm yang tidak dapat ditangani sekaligus tanpa mengatur prioritas.

Kesiapan operasi mencakup pelatihan membaca koordinat dan confidence, pemetaan offline, prosedur menghubungi warga, keselamatan lapangan, pengelolaan log, dan perlindungan siber. Latihan bersama menguji apakah alarm benar-benar diterima, siapa yang menindaklanjuti, berapa lama proses berlangsung, dan bagaimana laporan ditutup. Uji coba perlu mencakup kegagalan satelit, sensor, jaringan, listrik, dan personel.

Setelah setiap kejadian, pusat operasi memeriksa titik putus sistem: apakah data terlambat, koordinat tidak tepat, laporan tidak terverifikasi, tanggung jawab tumpang tindih, atau tim tidak dapat menjangkau lokasi. Perubahan prosedur dan anggaran harus mengikuti temuan. Pusat operasi yang matang bukan hanya memiliki layar besar, melainkan tim dengan wewenang, kompetensi, komunikasi, dan dukungan pemeliharaan yang berkelanjutan.

Indikator kerja dapat meliputi proporsi alarm yang ditinjau, median waktu tinjau, proporsi verifikasi lapangan, tingkat false alarm, waktu dari verifikasi ke tindakan, dan persentase data yang tersedia saat dibutuhkan. Metrik perlu dipilah menurut kabupaten dan jenis lanskap agar kesenjangan cakupan

terlihat. Penetapan target mempertimbangkan kondisi dasar dan ketersediaan sumber daya.

23. Teknologi dalam konteks penghidupan dan praktik lokal

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 dan tanggung jawab data operasional

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. Berbagi data dan koordinasi lintas wilayah

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. Tahapan implementasi oleh 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. Regulasi, standar, dan batas otomatisasi

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. Nilai ekonomi dan evaluasi manfaat pemantauan

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. Arsitektur digital: satelit, IoT, AI, dan pusat data

Arsitektur digital pemantauan dapat dibagi menjadi lima lapisan: akuisisi data, komunikasi, pengelolaan dan penyimpanan, analitik, serta layanan keputusan. Akuisisi mencakup satelit, sensor IoT, kamera, stasiun cuaca, peta, dan laporan masyarakat. Lapisan komunikasi mengirimkan data melalui internet, radio, seluler, LoRaWAN, atau satelit. Lapisan penyimpanan menjaga

data mentah dan turunan. Analitik menjalankan validasi, AI, pemetaan, dan model risiko. Layanan keputusan menyajikan peringatan, dashboard, aplikasi petugas, dan API bagi lembaga.

Arsitektur harus mengakomodasi latensi yang berbeda. Citra satelit near-real-time dapat tiba dalam beberapa jam; sensor lokal dapat mengirim pembacaan tiap menit atau jam; citra Sentinel-2 mungkin hanya berguna setelah awan berlalu; laporan lapangan dapat datang melalui radio atau aplikasi ketika jaringan tersedia. Sistem perlu memberi penanda waktu dan prioritas, serta tidak menunggu semua data lengkap sebelum memberi peringatan awal yang beralasan.

Edge computing memungkinkan node atau gateway menganalisis data lokal, misalnya mengidentifikasi ambang temperatur atau menjalankan model citra sederhana sebelum mengirimkan sinyal. Hal ini mengurangi kebutuhan bandwidth dan dapat mempertahankan fungsi saat internet putus. Namun, kapasitas perangkat terbatas, pembaruan model perlu dikelola, dan keputusan lokal harus tetap memiliki prosedur audit serta perlindungan terhadap manipulasi.

Cloud computing memudahkan penyimpanan skala besar, pemrosesan citra, dan kolaborasi, tetapi menimbulkan ketergantungan pada konektivitas, biaya berulang, lokasi data, keamanan, dan kontrak penyedia. Sistem hybrid dapat menyimpan data sensitif atau fungsi penting secara lokal sambil memanfaatkan cloud untuk analisis berat. Arsitektur harus menghindari satu titik kegagalan dan menjamin ekspor data serta pemulihan cadangan.

Katalog data dan layanan geospasial harus menautkan tiap alarm dengan sumbernya. Pengguna dapat menelusuri dari peta ke citra, rekaman sensor, skor model, catatan verifikasi, dan keputusan. Keterlacakan ini penting untuk audit dan pembelajaran serta membantu menjelaskan mengapa dua sistem memberi peringatan berbeda. Antarmuka perlu menyediakan mode sederhana untuk petugas dan mode analitis bagi ahli.

Keamanan siber merupakan bagian dari rancangan: autentikasi kuat, enkripsi data, pembaruan perangkat lunak, segmentasi jaringan, pencatatan aktivitas, prosedur respons insiden, dan pengujian pemulihan. Perangkat lapangan yang murah dapat menjadi titik masuk serangan jika kata sandi baku atau firmware tidak diperbarui. Jaringan kendali operasi dan jaringan publik perlu dipisahkan sesuai tingkat risiko.

Tata kelola arsitektur menetapkan pemilik sistem, pengelola data, operator, pengguna, standar integrasi, tingkat layanan, dan mekanisme eskalasi. Setiap fungsi harus memiliki rencana ketika satelit, sensor, model, jaringan, atau pusat data gagal. Arsitektur yang baik bukan diagram teknologi saja; ia mencakup anggaran, kompetensi, kontrak, prosedur, dan tanggung jawab.

30. Pengujian, validasi, dan evaluasi sistem

Penelitian dan evaluasi harus memisahkan kinerja teknis dari manfaat operasional. Kinerja teknis mencakup sensitivitas, spesifisitas, precision, recall, F1, false alarm, latensi, dan ketersediaan layanan. Kinerja operasional mencakup waktu dari deteksi ke verifikasi, waktu pengiriman tim, akses ke lokasi, dan perubahan keputusan. Hasil akhir dapat mencakup pengurangan luas terbakar atau kerugian, tetapi klaim atribusi memerlukan desain yang memperhitungkan cuaca, bahan bakar, dan kapasitas respons.

Data uji harus berbeda dari data pelatihan berdasarkan lokasi dan waktu. Pemisahan acak piksel dari citra yang sama dapat menyebabkan kebocoran dan hasil akurasi yang tampak tinggi. Pengujian lintas provinsi dan lintas sensor menilai apakah model mampu berpindah konteks. Data negatif yang mirip kebakaran—awan, permukaan panas, pembakaran terkontrol, cerobong, pantulan—perlu ada agar false alarm dapat dihitung secara realistis.

Validasi lapangan memerlukan protokol: siapa memeriksa alarm, berapa lama setelah diterima, bukti apa yang dicatat, apakah koordinat dikonfirmasi, bagaimana kondisi komunikasi, dan apa hasil pemeriksaan. Verifikasi bisa

dilakukan lewat pengamatan langsung, kamera, drone, atau laporan petugas, dengan mempertimbangkan keselamatan. Ground truth harus memiliki waktu dan kualitas, bukan hanya label yang ditambahkan setelah kejadian.

Evaluasi percontohan membandingkan proses sebelum dan sesudah penggunaan sistem, atau membandingkan wilayah serupa dengan dan tanpa intervensi, sambil mencatat keterbatasan. Wawancara operator, observasi kerja, log sistem, data sensor, dan catatan kejadian mengungkap alasan alarm dipakai atau diabaikan. Teknologi mungkin meningkatkan jumlah sinyal tetapi juga menambah beban petugas; evaluasi harus mengukur trade-off tersebut.

Pengujian stres dapat mensimulasikan pemadaman listrik, jaringan putus, satelit terlambat, sensor drift, data palsu, server gagal, dan lonjakan laporan. Latihan bersama membantu memastikan prosedur fallback bekerja. Sistem harus diuji dalam bahasa yang digunakan operator, dengan beban kerja nyata, dan kondisi musim kering atau hujan, bukan hanya pada skenario laboratorium yang ideal.

Hasil evaluasi perlu dipublikasikan dengan metrik, sampel, rentang waktu, kondisi penggunaan, dan keterbatasan. Kegagalan tidak seharusnya disembunyikan karena laporan tersebut membantu memperbaiki sistem dan melindungi keselamatan. Pihak pengembang, operator, dan lembaga pengadaan dapat menetapkan mekanisme pelaporan bug, koreksi, dan penarikan produk jika risiko melebihi manfaat.

31. Kepemimpinan dan koordinasi operasi pemantauan

Pusat operasi memerlukan pembagian peran yang tegas antara penerima data, analis, pemeriksa lapangan, pejabat pengambil keputusan, dan komunikator publik. Dashboard tidak menggantikan struktur komando. Setiap peringatan harus memiliki pemilik yang menerima, batas waktu verifikasi, prosedur eskalasi, dan cara menutup kasus. Jika tanggung jawab

tidak jelas, alarm dapat berpindah antarunit tanpa tindakan meskipun data akurat.

Pemimpin operasi perlu memahami bahwa sistem probabilistik menghasilkan ketidakpastian. Mereka menetapkan ambang berdasarkan risiko false negative dan false positive, sumber daya lapangan, serta konsekuensi masing-masing. Ambang tidak seharusnya diubah secara informal saat krisis tanpa pencatatan, karena keputusan tersebut memengaruhi prioritas dan audit setelah kejadian.

Koordinasi lintas sektor menyelaraskan kehutanan, lingkungan, kebencanaan, meteorologi, komunikasi, kesehatan, pemerintah daerah, perusahaan, dan desa. Rapat rutin sebelum musim kebakaran dapat menyepakati format laporan, waktu pembaruan, protokol verifikasi, lokasi ruang komunikasi, kanal cadangan, dan hubungan dengan pos komando. Data bersama perlu memiliki satu versi yang disepakati atau mekanisme untuk menjelaskan perbedaan.

Kepemimpinan juga menjamin dukungan untuk operator dan petugas. Sistem baru dapat menambah alarm, bekerja sepanjang malam, dan menempatkan tim dalam kondisi sulit. Jadwal kerja, akses pelatihan, keselamatan, perlindungan data, mekanisme umpan balik, serta pengakuan atas pengetahuan lokal mendukung keberlanjutan. Pengguna garis depan sebaiknya terlibat pada pengadaan dan uji coba.

Manajemen vendor perlu menetapkan tingkat layanan, keamanan, kepemilikan data, interoperabilitas, pembaruan algoritma, dokumentasi, waktu respons kegagalan, pengalihan sistem, dan akses kode atau metode sesuai kebutuhan. Ketergantungan total pada vendor dapat melemahkan kapasitas daerah. Kontrak harus menjelaskan siapa bertanggung jawab ketika data salah atau layanan berhenti dan bagaimana institusi dapat berpindah penyedia.

Setelah kejadian, pimpinan memfasilitasi tinjauan tanpa menyalahkan individu secara otomatis. Tujuannya memetakan titik putus sistem: apakah

sinyal terlambat, model bias, data hilang, laporan tidak diproses, atau akses lapangan terhalang. Rekomendasi harus diberi penanggung jawab, tenggat, dan anggaran. Pembelajaran organisasi memerlukan perubahan nyata, bukan hanya laporan pascakejadian.

32. Studi kasus dan pengujian lintas musim

Episode kebakaran 1997–1998, 2015, dan 2019 menyediakan kasus uji historis bagi sistem pemantauan. Setiap episode memiliki kekeringan, penggunaan lahan, instrumen satelit, jaringan sensor, dan tata kelola yang berbeda. Pembandingan perlu menyamakan definisi kejadian, rentang waktu, produk satelit, metode menghitung luas terbakar, serta sumber verifikasi. Data historis dapat mengungkap pola, tetapi perbedaan sensor dan metode dapat menimbulkan tren semu.

Kebakaran 2015 menjadi contoh kuat penggunaan deteksi active fire dan data aerosol untuk mengamati kejadian luas serta kabut asap. Produk MODIS dan VIIRS memberi cakupan hotspot, sedangkan model atmosfer dan data polusi membantu memperkirakan transportasi dan paparan. Koplitz et al. (2016) menunjukkan bagaimana emisi dan kualitas udara dapat dihubungkan untuk menilai paparan lintas wilayah. Kerangka ini tidak berarti setiap titik panas dapat dipadankan dengan satu dampak kesehatan; pemodelan dan validasi tetap dibutuhkan.

Studi pemetaan pada episode 2019 menggabungkan sensor termal, citra optik dan radar, titik panas, serta data cuaca untuk menilai perubahan area dan dampak lanskap. Hasil perlu mencatat ketika awan menghalangi citra optik atau ketika resolusi sensor tidak cukup untuk memetakan petak kecil. Sentinel-1 dan Sentinel-2 dapat memberi informasi komplementer dalam analisis bekas terbakar dan perubahan vegetasi, sementara verifikasi lapangan membantu menafsirkan kelas yang ambigu.

Pengujian AI lintas musim sebaiknya menggunakan satu tahun atau satu provinsi sebagai data uji yang tidak dipakai dalam pelatihan. Pemisahan

berdasarkan piksel saja dapat memberi akurasi yang terlalu optimistis karena sampel berdekatan memiliki pola yang sama. Evaluasi harus membandingkan hasil pada kebakaran kecil dan besar, gambut dan lahan mineral, kondisi berawan dan cerah, serta daerah dengan variasi sumber panas bukan-api.

Uji coba operasional dapat membandingkan skenario satelit saja, satelit ditambah IoT, dan fusi dengan laporan lapangan. Metrik meliputi waktu deteksi, precision, recall, false alarms per hari, waktu verifikasi, jumlah kunjungan lapangan yang tidak produktif, serta biaya pemeliharaan. Data harus dikumpulkan dengan definisi konsisten sebelum dan sesudah intervensi. Wawancara operator membantu menjelaskan apakah sistem digunakan, diabaikan, atau menghasilkan beban tambahan.

Pengujian perlu memasukkan kegagalan perangkat dan jaringan. Simulasi dapat menambahkan data hilang, sensor menyimpang, citra tertutup awan, keterlambatan produk, serta komunikasi putus. Tim operasi menguji fallback dan menilai apakah prioritas masih dapat dibuat. Hasil yang baik bukan hanya model akurat pada data lengkap, melainkan sistem yang tetap aman ketika sebagian komponennya tidak berfungsi.

Setiap studi kasus menghasilkan paket pembelajaran yang dapat dipakai kembali: data beserta metadata, peta final, catatan false alarms, rekaman verifikasi, keputusan, dampak terhadap operasi, dan rekomendasi. Proses ini membantu memperbarui model dan protokol secara transparan. Perubahan versi perlu dicatat agar hasil musim yang berbeda dapat dibandingkan dengan benar.

33. Jaringan sensor dan alur verifikasi lapangan

Alur lapangan untuk alarm terpadu dapat dimulai ketika satelit, sensor, atau laporan masyarakat menandai sinyal yang memenuhi kriteria. Sistem memberi ID unik, waktu, koordinat, sumber, tingkat keyakinan, dan data pendukung. Operator melakukan pengecekan silang terhadap sensor lain, cuaca, peta lahan, dan riwayat. Alarm yang memenuhi syarat diteruskan ke

unit daerah untuk verifikasi, lalu status diubah menjadi belum diperiksa, terverifikasi, tidak ditemukan, false alarm, atau selesai dengan jejak waktu.

Sensor lapangan dapat memantau kondisi yang sulit ditangkap satelit secara berkala: suhu, asap, partikulat, angin, dan kelembapan bahan bakar atau tanah. Beberapa sensor ditempatkan pada lokasi berisiko atau titik akses, bukan disebar merata tanpa tujuan. Penempatan perlu mempertimbangkan keterwakilan, keselamatan, legalitas, serta kemampuan mengganti baterai dan membersihkan sensor.

Logika alarm sebaiknya menggabungkan beberapa sinyal untuk mengurangi alarm tunggal yang menyesatkan. Peningkatan temperatur yang cepat, perubahan partikel, pergeseran angin, dan deteksi termal satelit pada area yang sama dapat menaikkan tingkat prioritas. Namun, sistem harus transparan tentang aturan dan tidak menunda peringatan jika indikator kritis muncul. Kombinasi dapat menggunakan aturan sederhana, model statistik, atau machine learning sesuai bukti dan kapasitas pemeliharaan.

Verifikasi di lapangan mencatat foto atau video, lokasi, arah asap, batas api, kondisi akses, sumber air, dan identitas petugas sesuai prosedur. Informasi sensitif seperti posisi personel tidak selalu boleh ditampilkan ke publik. Penggunaan drone dapat membantu mengamati perimeter dari jarak lebih aman, tetapi operasi memerlukan izin, pelatihan, cuaca mendukung, dan koordinasi agar tidak mengganggu pesawat pemadam.

Sensor perlu dikelola sebagai aset siklus hidup. Setiap unit memiliki pemilik, lokasi, tanggal pemasangan, spesifikasi, firmware, kalibrasi, riwayat perbaikan, status baterai, dan jadwal inspeksi. Sensor tidak aktif harus segera ditandai sebagai offline, bukan menyajikan data terakhir tanpa label. Perencanaan biaya memasukkan baterai, suku cadang, komunikasi, dan tenaga lapangan.

Partisipasi masyarakat dapat memperluas pengamatan, terutama di wilayah yang sulit dijangkau. Mekanisme pelaporan harus mudah dan aman, tersedia tanpa smartphone jika diperlukan, serta memberikan umpan balik. Warga tidak boleh didorong mendekati api atau mengambil risiko demi

mengumpulkan bukti. Sistem harus menjelaskan kapan laporan warga dipakai, bagaimana identitas dilindungi, dan bagaimana informasi yang keliru dikoreksi.

Sinyal lokal dikembalikan ke pusat data dan dapat digunakan untuk memperbarui peta risiko serta model setelah pemeriksaan kualitas. Pembelajaran dari false alarms harus membedakan masalah sensor, ambang, lingkungan, atau perangkat lunak. Perubahan parameter dicatat agar operasi antarmusim dapat dibandingkan.

34. Partisipasi sekolah, kampus, dan komunitas

Sekolah dan perguruan tinggi dapat menjadi mitra pemantauan melalui pendidikan geospasial, pengamatan kualitas lingkungan, dokumentasi perubahan lanskap, dan kerja sama riset. Program perlu memiliki protokol keselamatan, persetujuan, pengawasan, dan batas yang jelas: siswa tidak dikirim ke area berbahaya dan tidak mengidentifikasi pelaku berdasarkan citra tanpa bukti. Kegiatan pendidikan mengajarkan interpretasi data serta ketidakpastian, bukan sekadar membaca titik hotspot.

Sensor komunitas dapat membantu mendeteksi sinyal mikro-lingkungan dan menambah pengetahuan tentang wilayah. Instalasi dilakukan bersama pemilik lahan, masyarakat adat, pemerintah desa, dan kelompok terdampak. Persetujuan harus menjelaskan tujuan, jenis data, akses, durasi, pemeliharaan, dan mekanisme pemindahan perangkat. Data hasil pengamatan sebaiknya dikembalikan dalam bentuk yang berguna bagi masyarakat.

Keterlibatan lokal memperbaiki konteks. Warga mengetahui kanal yang tidak tergambar, jalur musiman, pembakaran pertanian terencana, sumber asap rutin, lokasi air, dan perubahan angin lembah. Informasi lokal dapat mengurangi salah tafsir model dan menentukan rute verifikasi yang aman. Namun, pengetahuan lokal harus diperlakukan sebagai kontribusi analitis dan dibagikan kreditnya, tidak diekstraksi tanpa manfaat atau persetujuan.

Kampus dapat menjadi laboratorium uji untuk membandingkan sensor, melatih model, mengembangkan dashboard, menguji konektivitas, dan mengukur dampak pelatihan. Hasil harus divalidasi di lapangan serta diserahkan dengan dokumentasi, lisensi, kode, dan prosedur pemeliharaan yang memadai. Prototype tanpa rencana operasional tidak dapat dianggap sistem siap pakai.

Pelatihan literasi data perlu menjangkau operator daerah, petugas kehutanan, BPBD, penyuluh, pemadam, guru, serta warga. Kompetensi meliputi membaca metadata, memahami confidence, membedakan hotspot dari api terverifikasi, menggunakan peta offline, melaporkan gangguan, dan menjaga keamanan data. Materi pelatihan dibuat dalam bahasa yang dapat dipahami dan disertai latihan praktis.

Partisipasi tidak boleh menggeser tanggung jawab publik kepada sukarelawan. Pemerintah dan perusahaan tetap bertanggung jawab menyediakan infrastruktur, operasi, keselamatan, dan tindak lanjut. Komunitas membantu merancang dan menilai sistem, sedangkan kewajiban respons dan penegakan tetap berada pada lembaga yang memiliki mandat dan sumber daya.

35. Penempatan sensor, konektivitas, dan daya

Penempatan node dimulai dengan tujuan pengukuran dan peta keputusan: deteksi dini, pengamatan kondisi gambut, perlindungan permukiman, atau verifikasi aktivitas di titik tertentu. Analisis cakupan dapat mempertimbangkan jarak sensor, topografi, vegetasi, zona radio, angin, akses, dan sumber energi. Optimasi komputer membantu mengeksplorasi alternatif, tetapi survei lapangan diperlukan untuk menguji hambatan dan kelayakan perawatan.

Konektivitas dapat memadukan LoRaWAN, jaringan mesh, seluler, radio data, Wi-Fi, atau satelit. LoRaWAN cocok untuk pesan kecil dengan konsumsi energi relatif rendah dalam konfigurasi yang tepat, tetapi jangkauannya

dipengaruhi antena, topografi, gangguan, dan kepadatan node. Pengiriman citra membutuhkan kapasitas lebih besar daripada data suhu, sehingga arsitektur dapat mengirim fitur atau alarm dulu, lalu citra saat bandwidth tersedia.

Daya dapat berasal dari baterai, panel surya, listrik lokal, atau kombinasi. Desain harus memperkirakan konsumsi sensor, gateway, pemancar, pemanas, dan pemrosesan; juga memperhitungkan cuaca, kanopi, debu, vandalisme, pencurian, dan musim hujan. Perawatan perlu dirancang sebelum pemasangan: siapa mengganti baterai, bagaimana mengakses lokasi, dan berapa biaya tahunan.

Node perlu menyimpan data saat offline dan mengirimkannya kemudian dengan penanda waktu akuisisi serta waktu penerimaan. Sinkronisasi jam penting untuk membandingkan sinyal beberapa sensor dan satelit. Algoritma perlu membedakan data terlambat dari data terbaru; penggunaan timestamp penerimaan sebagai pengganti timestamp observasi dapat menyesatkan urutan kejadian.

Pemetaan jangkauan radio dan uji coba di lingkungan hutan lebih bernilai daripada asumsi spesifikasi pabrik. Penempatan gateway di elevasi atau struktur yang legal dapat memperbaiki jangkauan, tetapi menambah biaya dan kebutuhan keamanan. Sistem perlu memiliki konfigurasi alternatif ketika satu gateway rusak, serta menyimpan rute dan kode perangkat secara terdokumentasi.

Konektivitas perlu dinilai dari biaya total, bukan hanya harga perangkat. Langganan seluler atau satelit, penggantian baterai, tenaga teknis, kalibrasi, dan penggantian unit membentuk biaya siklus hidup. Pemerintah daerah dapat memakai standar terbuka agar perangkat berbeda dapat berkomunikasi, menghindari ketergantungan vendor, dan memungkinkan suku cadang lebih mudah diperoleh.

Keandalan perangkat harus diverifikasi melalui uji lingkungan dan audit keamanan. Proteksi fisik, autentikasi, enkripsi, pembaruan firmware, dan

segmentasi jaringan mengurangi risiko gangguan dan manipulasi. Sistem juga memerlukan prosedur untuk menarik perangkat yang telah rusak atau tidak terpakai agar tidak terus mengirim data keliru.

36. Keselamatan petugas, UAV, dan operasi di lapangan

Keselamatan personel adalah batas utama pemantauan. Petugas tidak boleh mendekati api aktif hanya untuk memenuhi kebutuhan verifikasi. Rencana lapangan mempertimbangkan angin, visibilitas, asap, akses keluar, jaringan komunikasi, sumber air, potensi api bawah permukaan, dan kondisi kesehatan. Penggunaan sensor jarak jauh, kamera, atau UAV dapat mengurangi paparan, namun tidak meniadakan bahaya dan harus tunduk pada komando operasi.

Drone dapat memetakan perimeter, memeriksa titik panas, mengamati akses, atau mendukung pencarian lokasi. Kamera termal dan visual menawarkan gambaran lokal, tetapi resolusi dan cakupan dibatasi daya baterai, cuaca, line of sight, izin, dan kemampuan operator. Asap pekat dan panas dapat mengganggu sensor; drone tidak menggantikan citra satelit untuk wilayah luas maupun tim pemadam untuk tindakan di tanah.

Informasi UAV harus bertimestamp, berkoordinat, diberi orientasi dan ketinggian, serta disimpan dengan prosedur keamanan. Operator perlu menghindari penerbangan di atas personel atau aset tanpa koordinasi. Data video dapat menangkap rumah dan orang, sehingga akses, retensi, dan pembagian harus dibatasi sesuai kebutuhan operasi dan aturan yang berlaku.

Petugas lapangan dapat memakai aplikasi peta offline untuk menerima koordinat, mencatat temuan, dan mengirim pembaruan ketika jaringan tersedia. Antarmuka harus sederhana, hemat daya, menggunakan simbol yang konsisten, dan menampilkan lokasi serta waktu dengan jelas. Laporan harus dapat dibuat secara manual jika perangkat rusak atau layar sulit dibaca saat kondisi operasi.

Sinyal satelit dan IoT perlu mendukung, bukan menggantikan, komunikasi radio antarunit. Kanal darurat dan protokol panggilan harus diuji sebelum musim kebakaran. Pusat operasi mengonfirmasi penerimaan dan memastikan instruksi tidak bertentangan. Sistem lokasi personel harus memiliki pengendalian akses agar informasi keselamatan tidak menjadi sumber risiko keamanan.

Evaluasi pascakejadian mencatat apakah teknologi mengurangi waktu paparan dan meningkatkan keselamatan petugas. Temuan tentang insiden hampir celaka, blind spots, gangguan baterai, dan kesalahan navigasi harus ditinjau tanpa menunggu terjadi korban. Pembaruan prosedur keselamatan merupakan salah satu hasil penting dari pemantauan digital.

37. Komunikasi peringatan yang 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. Pemantauan bekas bakar dan pemulihan ekologis

Citra satelit pascakebakaran digunakan untuk memetakan perubahan permukaan, area terbakar, dan tingkat keparahan relatif. Indeks spektral dan klasifikasi machine learning dapat membantu membedakan vegetasi sehat, lahan terbakar, tanah terbuka, dan perubahan lain. Awan dan regenerasi cepat menyulitkan observasi optik; radar Sentinel-1 dapat memberi informasi komplementer pada kondisi berawan. Hasil sebaiknya divalidasi melalui survei lapangan dan interpretasi konteks lokal.

Perubahan yang terlihat dari atas memiliki arti berbeda menurut ekosistem. Api di lahan mineral, gambut, savana, atau perkebunan menghasilkan pola

spektral dan pemulihan yang berbeda. Model yang dilatih pada satu tipe vegetasi tidak boleh diterapkan tanpa pengujian pada tipe lain. Peta bekas bakar dapat mendukung prioritas pemulihan, tetapi tidak selalu menunjukkan ketebalan gambut terbakar, kualitas tanah, atau kondisi akar.

Pemantauan pemulihan dapat menelusuri vegetasi, kelembapan, muka air gambut, erosi, kondisi kanal, keanekaragaman habitat, dan penggunaan lahan sepanjang beberapa musim. Sensor in situ dan citra multi-temporal saling melengkapi. Indikator harus disepakati sejak desain restorasi sehingga data awal menjadi baseline, metode tetap dapat dibandingkan, dan kemajuan bisa dievaluasi.

AI dapat membantu memetakan severitas atau tingkat perubahan dengan menggabungkan citra pra- dan pascakebakaran, indeks vegetasi, elevasi, dan data lapangan. Interpretasi harus menyatakan apakah kategori bersifat relatif atau memiliki kalibrasi lapangan. Peta probabilitas lebih jujur ketika kelas tepi tidak pasti daripada batas pasti yang dibuat algoritma. Hasil tidak boleh dipakai sendiri untuk mengalokasikan sanksi atau ganti rugi.

Pemantauan jangka panjang perlu mempertimbangkan bahwa ekosistem dapat pulih secara berbeda dan tindakan manusia dapat mengubah sinyal. Penanaman, pembasahan kembali, pembukaan baru, banjir, atau panen dapat terlihat sebagai perubahan spektral. Catatan intervensi dan penggunaan lahan membantu menghubungkan data citra dengan proses nyata. Masyarakat lokal dapat memberi konteks untuk memeriksa perubahan yang tidak tampak dari sensor.

Data pascakebakaran kembali ke sistem manajemen risiko. Lokasi yang berulang kali terbakar dapat menjadi prioritas patroli dan pemulihan hidrologi; perubahan akses atau kanal dapat memperbarui peta bahaya; hasil restorasi dapat mengubah model prediksi. Siklus pembelajaran hanya berjalan jika data pemulihan tersedia bagi lembaga yang mengelola pencegahan sebelum musim berikutnya.

39. Indikator kinerja dan perbaikan sistem

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 data terpadu untuk kebakaran

Data pemantauan perlu mengikuti rantai kejadian: prakondisi, penyalaan, pertumbuhan, emisi, paparan, respons, dan pemulihan. Lapisan GIS dapat menyimpan tutupan lahan, gambut, jalan, kanal, izin, batas administrasi, cuaca, sensor, laporan, aset, dan area terbakar. Setiap lapisan harus memiliki waktu, skala, pemilik, kualitas, dan hak akses yang jelas. Sistem mencegah hilangnya konteks ketika peta dari beberapa lembaga ditumpuk.

Data waktu menjadi sama pentingnya dengan lokasi. Waktu akuisisi citra, pengiriman paket IoT, laporan masyarakat, validasi, dan respons harus dicatat terpisah. Sistem yang hanya menampilkan waktu terakhir diperbarui tidak menunjukkan kapan pengamatan berlangsung. Sinkronisasi zona waktu dan format tanggal mencegah kebingungan saat kejadian bergerak cepat atau melintasi provinsi.

Fusi data menggabungkan sumber yang saling melengkapi, tetapi harus mempertahankan asal data. Deteksi thermal satelit, sensor temperatur, prakiraan angin, kelembapan gambut, dan laporan warga dapat digabungkan melalui aturan, Bayesian fusion, atau model AI. Setiap keluaran perlu menyimpan kontribusi input, kualitas, dan logika keputusan agar analis dapat menilai mengapa confidence berubah.

Sistem informasi geografis dapat membuat tampilan per pengguna: peta operasi untuk posko, ringkasan risiko untuk pimpinan, peringatan publik untuk warga, dan data terstruktur bagi peneliti. Tampilan harus menghindari pembaruan yang menimpa versi lama tanpa arsip. Pencarian, filter, ekspor, dan tampilan offline membantu operasi di daerah dengan jaringan terbatas.

API dan standar terbuka memudahkan lembaga berbagi data serta menghindari input manual berulang. Data yang dikirim harus memiliki autentikasi, dokumentasi, batas laju, dan versi skema. Lembaga perlu menyepakati apa yang dapat dibuka, apa yang terbatas, waktu pembaruan, dan siapa yang bertanggung jawab jika ada kesalahan.

Arsip jangka panjang memungkinkan analisis tren dan audit. Data mentah, produk yang diterbitkan, snapshot dashboard, dan catatan tindakan disimpan dengan kebijakan retensi yang memadai. Penyimpanan harus memiliki cadangan terpisah, pemeriksaan integritas, dan prosedur pemulihan. Data yang hilang pada satu musim dapat membuat evaluasi multi-tahun tidak dapat dilakukan.

Integrasi dari desa sampai lanskap perlu menjaga kesetaraan kapasitas. Desa atau kabupaten yang tidak memiliki analis geospasial tetap harus menerima produk yang dapat digunakan, sementara fasilitas nasional dapat menyediakan pemrosesan dan dukungan teknis. Sistem terdistribusi dengan peran jelas lebih kuat daripada platform pusat yang tidak memiliki jalur komunikasi dengan pengguna lokal.

41. Integrasi pemantauan dari 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. Protokol peringatan dini dan operasi pusat kendali

Protokol peringatan dini menetapkan kondisi pemicu, pihak penerima, tingkat urgensi, waktu verifikasi, dan tindakan yang diharapkan. Tahap dapat berupa waspada berdasarkan risiko, sinyal otomatis belum terverifikasi, laporan terkonfirmasi, respons aktif, dan penutupan kejadian. Setiap status harus memiliki definisi agar beberapa daerah tidak memakai label yang sama untuk kondisi berbeda.

Pusat kendali menerima data dari satelit, sensor, prakiraan cuaca, drone, dan pelapor. Operator memeriksa mutu dan konteks, kemudian mengarahkan alarm ke instansi dengan kewenangan yang sesuai. Jika alarm berdampak pada keselamatan, pusat kendali tidak boleh menunggu laporan sempurna; prosedur harus mengizinkan peringatan awal dengan tingkat keyakinan yang dinyatakan.

Notifikasi dapat dikirim melalui dashboard, SMS, aplikasi, radio, email, dan kanal komunikasi lokal. Pesan internal memuat koordinat, waktu observasi, sumber, confidence, akses, dan tindakan. Pesan publik menggunakan bahasa yang sederhana, menyebut status yang diketahui dan belum diketahui, serta memberi informasi bagaimana melaporkan atau mencari bantuan. Pengiriman perlu meminta konfirmasi penerimaan untuk alarm prioritas tinggi.

Prosedur fallback mencakup kegagalan jaringan, pemadaman listrik, server tidak tersedia, sensor offline, satelit tertutup awan, atau pusat operasi tidak dapat dihubungi. Radio, telepon, peta cetak, daftar kontak, serta pencatatan manual menjadi bagian dari desain, bukan improvisasi saat krisis. Latihan rutin menguji apakah transisi dari sistem digital ke cara cadangan berjalan.

Setelah verifikasi, tindakan ditetapkan sesuai sumber daya dan risiko: patroli, pemeriksaan koordinat, pemadaman awal, penutupan area, peringatan masyarakat, atau koordinasi lintas kabupaten. Status sistem diperbarui agar alarm lain tidak terduplikasi dan sumber daya terlihat. Informasi akhir—api ditemukan, api tidak ada, atau status belum pasti—dicatat untuk mengukur mutu deteksi.

Evaluasi protokol meninjau waktu antara setiap tahap, proporsi alarm yang terverifikasi, false alarms, peringatan yang tidak diterima, dan tindakan yang tertunda. Analisis tidak hanya menyalahkan operator; ia memeriksa kualitas sensor, perancangan UI, pembagian peran, beban kerja, pelatihan, dan dukungan jaringan. Protokol diubah berdasarkan bukti dan diuji lagi melalui simulasi.

Kesiapan pusat kendali membutuhkan staf terlatih, jadwal jaga, pembaruan peta, dukungan teknis, ruang kerja, komunikasi, dan anggaran operasi. Platform yang hanya aktif saat proyek berjalan tidak membangun sistem peringatan berkelanjutan. Pemerintah perlu menempatkan fungsi pemantauan sebagai bagian dari mandat dan prosedur rutin lembaga.

43. Pengadaan, interoperabilitas, dan standar teknis

Pengadaan sensor, kamera, drone, perangkat komputasi, dan platform perlu dimulai dari kebutuhan keputusan serta spesifikasi minimum, bukan dari katalog produk. Dokumen pengadaan menyebut parameter yang diukur, rentang operasi, ketelitian, interval pengiriman, format data, toleransi lingkungan, kebutuhan daya, jangkauan komunikasi, keamanan, masa garansi, suku cadang, dan jadwal pemeliharaan.

Interoperabilitas mengurangi ketergantungan pada satu produsen. Perangkat sebaiknya mendukung format data terbuka, protokol komunikasi terdokumentasi, ekspor data, API, dan mekanisme migrasi. Pemerintah harus memiliki akses ke data mentah dan hasil olahan serta hak menggunakan data setelah kontrak berakhir. Perangkat proprietary dapat digunakan bila kebutuhan jelas, tetapi harus tersedia jalur integrasi dan keluar dari kontrak.

Standar sensor harus menentukan prosedur kalibrasi, kolokasi dengan alat rujukan, pemeriksaan drift, metadata, ambang kualitas, cara menangani data hilang, dan penandaan data tidak valid. Standar citra dan produk geospasial mengatur proyeksi, resolusi, waktu, tingkat pemrosesan, dan skema confidence. Kepatuhan dapat diperiksa melalui tes penerimaan sebelum pembayaran penuh dan audit berkala setelah instalasi.

Kriteria pengadaan AI mencakup dokumentasi dataset dan versinya, metrik validasi, performa pada kelas penting, batas penggunaan, penjelasan keluaran, pencatatan keputusan, pembaruan model, keamanan, dan prosedur rollback. Janji akurasi vendor perlu diuji pada data Indonesia yang representatif. Sistem dinilai pada biaya total dan hasil operasional, bukan satu persentase akurasi yang tidak disertai konteks.

Persyaratan pengadaan perlu mendukung persaingan dan kapasitas lokal. Perangkat dapat diuji oleh universitas atau laboratorium independen; pelatihan dan dokumentasi disediakan dalam bahasa yang dipahami operator. Kontrak mencakup transfer kompetensi, dukungan, tingkat layanan, garansi, keselamatan siber, dan tanggung jawab saat produk gagal. Hal ini mengurangi risiko pembelian alat yang tidak dapat dirawat setelah proyek selesai.

Pengadaan publik juga mengikuti aturan transparansi, konflik kepentingan, evaluasi teknis yang setara, dan perlindungan data. Penggunaan data lokasi atau kamera di masyarakat harus dijelaskan serta didukung mekanisme keluhan. Keputusan vendor dan spesifikasi dapat diaudit agar sistem dipilih

karena manfaat dan kesesuaian, bukan karena promosi atau tekanan jangka pendek.

44. Biaya pemeliharaan dan keberlanjutan sistem

Biaya sistem pemantauan meliputi perancangan, perangkat, lisensi, konektivitas, penyimpanan, kalibrasi, energi, tenaga kerja, pelatihan, suku cadang, penggantian, keamanan siber, evaluasi, dan pembaruan. Harga beli bukan ukuran biaya sesungguhnya. Sensor murah yang rusak berulang atau layanan cloud yang biaya langganannya naik dapat menjadi lebih mahal dalam beberapa tahun daripada perangkat dengan mutu dan dukungan lebih baik.

Analisis biaya siklus hidup menghitung biaya tetap dan variabel selama umur layanan, dengan skenario perubahan harga, tingkat kerusakan, masa hidup baterai, dan ketersediaan jaringan. Anggaran tahunan harus memastikan fungsi pemeliharaan sebelum perluasan jumlah sensor. Pemantauan berskala kecil yang terawat sering memberi nilai lebih daripada ribuan perangkat yang offline atau tidak dikalibrasi.

Manfaat dapat diukur melalui waktu deteksi yang lebih singkat, prioritas patroli lebih baik, pengurangan perjalanan yang tidak produktif, penyebaran peringatan lebih tepat, peningkatan verifikasi, dan dukungan keputusan pemulihan. Penilaian ekonomi dapat membandingkan manfaat tersebut dengan biaya, tetapi perlu menghindari klaim bahwa sistem sendirian mencegah kebakaran. Cuaca, penegakan hukum, tata guna lahan, dan respons juga memengaruhi hasil.

Pembiayaan dapat menggabungkan APBN, APBD, dukungan riset, dana kebencanaan, dan kontribusi sektor yang mendapat manfaat atau memiliki kewajiban pengelolaan. Pembagian biaya harus mempertimbangkan kemampuan kabupaten berisiko tinggi dan menghindari kesenjangan cakupan karena basis pajak setempat rendah. Kemitraan harus menjamin

kepemilikan dan akses data publik, serta tidak memberi satu perusahaan hak eksklusif atas informasi dasar risiko.

Skema berbasis hasil dapat mengaitkan pembayaran dengan waktu operasi sensor, mutu data, cakupan verifikasi, atau ketersediaan layanan, bukan jumlah perangkat terpasang saja. Indikator harus dapat diverifikasi secara independen dan tidak mendorong manipulasi, misalnya menurunkan jumlah alarm dengan menaikkan ambang terlalu tinggi. Audit teknis dan konsultasi pengguna menyeimbangkan insentif.

Evaluasi ekonomi disertai pemeriksaan distribusi manfaat dan beban. Masyarakat di area risiko perlu memperoleh peringatan dan layanan; petugas membutuhkan perlindungan; pemerintah daerah perlu kapasitas teknis; dan pengelola data harus memiliki anggaran jangka panjang. Sistem layak diperluas ketika manfaat operasional terbukti, biaya dapat ditanggung, dan lembaga memiliki kemampuan mempertahankannya.

45. Keamanan siber, privasi, dan kepercayaan sistem

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. Prioritas riset satelit, AI, dan IoT di Indonesia

Prioritas penelitian pertama ialah mengukur kinerja berbagai satelit dan sensor pada ekosistem Indonesia, terutama gambut, hutan sekunder, perkebunan, savana, dan kawasan berawan. Validasi perlu membandingkan waktu deteksi, resolusi, false alarms, omission, dan kemampuan memetakan api kecil. Dataset lokal terbuka dengan dokumentasi waktu, lokasi, klasifikasi, dan sumber verifikasi akan memperkuat pengembangan model.

Riset kedua mengembangkan AI yang dapat berpindah lintas provinsi dan musim. Model diuji pada data yang tidak beririsan secara geografis dan temporal, serta dievaluasi menurut tipe lanskap, tutupan awan, intensitas, dan sumber gangguan. Studi perlu membandingkan deep learning dengan aturan sederhana dan baseline statistik, termasuk biaya komputasi, latensi, interpretabilitas, dan kebutuhan label.

Riset IoT mencakup kalibrasi sensor dalam kelembapan dan panas tropis, ketahanan baterai, jangkauan LoRa atau radio di bawah kanopi, komunikasi satelit berbiaya rendah, dan metode pengiriman saat jaringan putus. Studi jangka panjang dapat menghitung biaya kepemilikan dan tingkat ketersediaan aktual, bukan hanya akurasi uji laboratorium. Sensor harus diuji selama musim dan kondisi ekstrem.

Riset fusi data menilai apakah penggabungan satelit, cuaca, sensor lapangan, dan laporan masyarakat benar-benar mempercepat verifikasi dan meningkatkan hasil respons. Metode dapat berupa uji coba terkontrol, stepped-wedge, studi kuasi-eksperimental, atau evaluasi implementasi. Luaran seperti menit deteksi, waktu pengiriman, luas terbakar, dan keselamatan petugas perlu didefinisikan sejak awal.

Studi human factors meneliti bagaimana petugas memahami confidence, false alarm, peta, dan rekomendasi AI; berapa banyak alarm yang dapat dikelola; serta bagaimana kelelahan, pergantian shift, dan jaringan putus memengaruhi keputusan. Pengalaman masyarakat tentang pelaporan dan

umpan balik juga perlu dikaji untuk memastikan sistem dipercaya dan tidak menimbulkan kerugian.

Penelitian tata kelola dapat menganalisis kepemilikan data, perizinan penginderaan, kontrak vendor, privasi, keamanan siber, tanggung jawab atas alarm, dan pembagian manfaat. Studi lintas kabupaten dapat mengidentifikasi mekanisme yang membuat data lintas sektor dapat dipakai tanpa melanggar hak. Hasilnya perlu diterjemahkan ke standar nasional dan panduan daerah.

Kolaborasi dengan BRIN, perguruan tinggi, BMKG, lembaga kehutanan, badan penanggulangan bencana, pemerintah daerah, perusahaan, dan komunitas perlu memiliki agenda bersama serta pembiayaan multi-tahun. Laboratorium dan data uji dapat diakses oleh tim lokal; pelatihan dan pengembangan kapasitas menjadi luaran program. Dengan demikian, riset tidak berhenti pada prototype dan publikasi, tetapi memperkuat kemampuan operasional Indonesia.

47. Infrastruktur komunikasi dan komputasi yang tangguh

Infrastruktur pemantauan memerlukan listrik, jaringan, server atau cloud, penyimpanan, sensor pengganti, pusat operasi, dan tenaga teknis. Setiap bagian memiliki potensi kegagalan yang saling memengaruhi. Gangguan listrik dapat mematikan gateway; sinyal seluler lemah dapat menunda alarm; kerusakan server dapat menghilangkan peta; kekurangan analis dapat membuat notifikasi tidak diperiksa. Rencana kesinambungan bisnis harus memetakan ketergantungan dan fungsi minimum yang tetap perlu berjalan.

Sistem harus mampu bekerja pada tingkat konektivitas yang berbeda. Node menyimpan data saat jaringan putus, aplikasi peta dapat digunakan offline, dan alarm utama dapat dikirim melalui radio. Sinkronisasi ketika jaringan pulih perlu menghindari duplikasi atau kehilangan catatan. Data lama diberi waktu observasi agar tidak tampak sebagai kondisi terkini.

Ketahanan fisik berarti perangkat dipasang dengan perlindungan cuaca, grounding, penyangga, dan pengamanan yang sesuai. Sistem digital memerlukan cadangan daya, backup data, replikasi, dan uji pemulihan. Sensor atau kamera di lokasi terpencil perlu mudah diganti tanpa membawa seluruh sistem ke pusat. Dokumentasi dan stok suku cadang merupakan komponen teknis inti.

Ketahanan organisasi mencakup lebih dari perangkat. Institusi perlu membangun staf pengganti, prosedur tertulis, pelatihan silang, dukungan lintas daerah, kontrak layanan, dan pembiayaan multi-tahun. Pergantian pejabat atau penghentian proyek tidak boleh menghapus pengetahuan sistem dan akses data.

Perlindungan siber mencakup inventaris aset, patch, autentikasi, enkripsi, pengendalian akses, pemantauan log, dan latihan respons. Insiden siber dapat mengganggu sensor atau mengubah data, sehingga sumber sinyal dan integritas paket harus diperiksa. Prosedur operasi harus menyatakan cara menyampaikan peringatan apabila platform digital dicurigai disusupi.

Peta risiko kegagalan membantu menetapkan prioritas investasi: bagian mana yang menjadi single point of failure, berapa lama layanan boleh terhenti, dan sumber alternatif apa tersedia. Latihan tahunan menguji tidak hanya sistem saat online, tetapi juga skenario offline. Hasilnya perlu menjadi dasar pembaruan pengadaan dan prosedur.

Layanan yang tangguh memulihkan operasi secara bertahap dan transparan. Pengguna diberi tahu data mana yang tersedia, mana tertunda, dan apakah model masih dapat dipercaya setelah gangguan. Kejujuran ini mencegah keputusan dibuat dari tampilan yang seolah lengkap.

48. Audit, keterlacakan, 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 ke dalam perencanaan dan anggaran 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 implementasi bertahap

Satelit, AI, dan IoT dapat memperkuat pemantauan kebakaran hutan dengan menggabungkan cakupan wilayah luas, pengamatan lokal yang berulang, dan analisis otomatis. Satelit membantu mengidentifikasi anomali termal, tutupan, asap, dan bekas terbakar; IoT memberi data mikro-lingkungan dan sinyal cepat; AI menyaring, mengklasifikasi, memadukan, dan memprioritaskan informasi. Ketiganya memiliki batas pada resolusi, latensi, awan, jangkauan, daya, kalibrasi, representasi data, dan generalisasi model.

Sistem yang andal menghubungkan pengamatan dengan verifikasi manusia, keputusan, komunikasi, dan tindakan. Alarm perlu memiliki sumber, waktu, confidence, status pemeriksaan, dan pemilik tindak lanjut. Infrastruktur harus berfungsi ketika jaringan gagal, data hilang, atau model tidak tersedia. Pengadaan memperhitungkan biaya siklus hidup, interoperabilitas, keamanan, pengembangan kapasitas, dan ruang bagi pengetahuan lokal.

Indonesia perlu menerapkan sistem secara bertahap: mulai dari kebutuhan operasional dan baseline data, uji coba di lokasi berisiko dengan sensor serta komunikasi yang sesuai, integrasi bertahap dengan satelit dan AI, evaluasi mandiri, lalu perluasan jika manfaat dan keberlanjutan terbukti. Standar nasional, katalog data, dukungan teknis, serta pendanaan pemeliharaan dapat mengurangi fragmentasi antardaerah.

Keberhasilan tidak dinilai dari jumlah satelit, sensor, atau model yang digunakan, melainkan dari mutu data, waktu deteksi dan verifikasi, ketepatan prioritas, keselamatan petugas, berkurangnya kejadian yang tidak tertangani, dan pemanfaatan informasi oleh masyarakat serta pembuat kebijakan. Teknologi menjadi infrastruktur publik yang bermanfaat ketika akuntabel, dapat dipahami, dirawat, dan terhubung dengan tindakan nyata.

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

Azevedo, B. F., Brito, T., Lima, J., & Pereira, A. I. (2021). Optimum sensors allocation for a forest fires monitoring system. Forests, 12(4), Article 453. https://doi.org/10.3390/f12040453

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

European Space Agency. (n.d.-a). Sentinel-1. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-12

European Space Agency. (n.d.-b). Sentinel-2. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2

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

Ghali, R., & Akhloufi, M. A. (2023). Deep learning approaches for wildland fires using satellite remote sensing data: Detection, mapping, and prediction. Fire, 6(5), Article 192. https://doi.org/10.3390/fire6050192

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

Kizilkaya, B., Ever, E., Yatbaz, H. Y., & Yazici, A. (2022). An effective forest fire detection framework using heterogeneous wireless multimedia sensor networks. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, 18(2), Article 47. https://doi.org/10.1145/3473037

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

National Aeronautics and Space Administration. (n.d.). Fire Information for Resource Management System (FIRMS). https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/

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

Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., & Csiszar, I. A. (2014). The new VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. Remote Sensing of Environment, 143, 85–96. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.008

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