DAMPAK KABUT ASAP PADA KESEHATAN MASYARAKAT

Selama Periode El Niño

El Niño dapat meningkatkan peluang kondisi kering di sebagian wilayah Indonesia, namun tidak selalu menyebabkan kebakaran. Dampaknya berbeda antar wilayah.





DAMPAK KESEHATAN



Iritasi mata dan tenggorokan



Batuk, sesak, dan gejala asma memburuk



Risiko gangguan pernapasan dan kardiovaskular

KELOMPOK RENTAN



Anak-anak dan bayi



Lansia



Ibu hamil



Penderita penyakit paru atau jantung



Pekerja luar ruang dan warga dekat kebakaran

PERLINDUNGAN & KESIAPSIAGAAN



Pantau informasi kualitas udara resmi



Kurangi aktivitas luar ruang saat asap pekat



Cari ruang dengan udara lebih bersih



Gunakan respirator yang pas bila dianjurkan



Jaga obat rutin dan ikuti arahan tenaga kesehatan



Cegah api: jaga gambut tetap basah dan terapkan pembukaan lahan tanpa bakar



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

Dampak Kabut Asap pada Kesehatan Masyarakat selama Periode El Niño

Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD

www.rudyct.com/cv.pdf

IBM-ASMI | RudyCT Academic Series

Abstract

Kabut asap akibat kebakaran hutan dan lahan merupakan ancaman kesehatan lintas wilayah yang dapat memburuk pada musim kering terkait El Niño. El Niño tidak dengan sendirinya menyalakan api atau menghasilkan kabut asap; pengaruhnya terutama melalui perubahan peluang hujan dan kekeringan, sedangkan penggunaan lahan, drainase gambut, pembukaan lahan dengan api, kondisi bahan bakar, angin, dan tata kelola menentukan apakah kekeringan berkembang menjadi kebakaran besar. Pembakaran biomassa menghasilkan campuran partikulat halus ($PM_{2.5}$), partikulat kasar, karbon monoksida, senyawa organik, dan polutan lain. Paparan jangka pendek dapat memicu iritasi dan memperburuk penyakit pernapasan maupun kardiovaskular; paparan berulang dan pada masa awal kehidupan juga menimbulkan kekhawatiran terhadap kesehatan jangka panjang. Risiko tidak merata: anak, lansia, ibu hamil, penyandang penyakit kronis, pekerja luar ruang, masyarakat di sekitar gambut, serta kelompok dengan sumber daya dan akses layanan terbatas memerlukan perlindungan khusus. Artikel ini menelaah jalur iklim–kebakaran–paparan–kesehatan, bukti Indonesia dan Asia Tenggara, keterbatasan pengukuran dampak, serta strategi pencegahan, kesiapsiagaan kesehatan, komunikasi risiko, perlindungan sosial, dan pemulihan lanskap. Argumen pokoknya adalah bahwa perlindungan kesehatan paling efektif dimulai sebelum asap muncul: mencegah api, menjaga gambut tetap basah, mengurangi pembakaran,

menyiapkan layanan dan pekerja, serta memastikan bantuan menjangkau warga yang paling sulit menghindari paparan.

Kata kunci: El Niño; kabut asap; kebakaran hutan dan lahan; gambut; $PM_{2.5}$; kesehatan masyarakat; kesehatan anak; kelompok rentan; Indonesia; kesiapsiagaan.

1. Pendahuluan: kabut asap sebagai risiko kesehatan dan tata kelola

Kabut asap kebakaran hutan dan lahan bukan sekadar gangguan jarak pandang atau peristiwa musiman yang membuat udara tidak nyaman. Ia adalah campuran pencemar yang dapat bergerak melintasi kabupaten, provinsi, bahkan batas negara, sehingga sumber api dan tempat orang menghirup asap sering berjauhan. Paparan dapat menimbulkan gejala segera seperti mata perih, batuk, sesak, dan sakit kepala, tetapi juga memperburuk asma, penyakit paru obstruktif kronis, penyakit jantung, serta kondisi kesehatan lain. Dalam suatu episode besar, sekolah, tempat kerja, transportasi, pelayanan kesehatan, dan kegiatan ekonomi dapat terganggu bersamaan. Dengan demikian, kabut asap harus dibahas sebagai masalah kesehatan masyarakat, pengelolaan lanskap, perlindungan sosial, dan tata kelola lintas sektor.

Hubungan kabut asap dengan El Niño penting bagi Indonesia karena sejumlah musim kebakaran besar terjadi ketika kondisi kering bertepatan dengan El Niño kuat. Akan tetapi, urutan sebabnya harus dijelaskan dengan tepat. El Niño adalah pola variabilitas laut-atmosfer di Pasifik tropis yang dapat mengubah peluang curah hujan di berbagai wilayah. Di Indonesia, pengaruhnya tidak seragam dan dapat berinteraksi dengan monsun, Indian Ocean Dipole (IOD), topografi, serta kondisi lokal. Kekeringan memperbesar peluang bahan organik mengering dan membuat api lebih mudah menyala atau menyebar. Namun, kekeringan bukan sumber penyulut api. Sumber penyalaan sering berkaitan dengan aktivitas manusia,

sementara besarnya kebakaran dipengaruhi praktik pembukaan lahan, pengelolaan gambut, cuaca, akses pemadaman, dan penegakan aturan (Field et al., 2016; Marlier et al., 2013).

Penjelasan yang membebankan semua kejadian kepada El Niño akan menyederhanakan masalah dan mengaburkan ruang kebijakan. Pemerintah tidak dapat mengendalikan ENSO, tetapi dapat mengurangi kondisi lanskap yang membuat api mudah merambat, menyediakan mata pencaharian tanpa bakar, menegakkan larangan secara adil, dan melindungi masyarakat dari asap. Sebaliknya, menganggap kebakaran hanya akibat perilaku individu juga mengabaikan tata kelola lahan, insentif ekonomi, riwayat pengeringan gambut, ketimpangan akses, dan lemahnya sistem pencegahan. Kerangka yang memadai harus sekaligus menjelaskan bahaya iklim, sumber emisi, pola paparan, dan kapasitas perlindungan.

Artikel ini menempatkan pengalaman Indonesia dalam konteks regional dan global. Bagian awal membahas ENSO, kebakaran, dan karakteristik asap; kemudian menguraikan mekanisme biologis, dampak akut dan jangka panjang, kelompok rentan, serta bukti dari kejadian 1997, 2015, dan 2019. Bagian berikutnya menelaah pengukuran paparan, beban pada layanan kesehatan, ketimpangan sosial, komunikasi, dan strategi respons. Uraian ditutup dengan kerangka kebijakan, agenda riset, contoh tindakan untuk beberapa jenis wilayah, dan indikator evaluasi. Estimasi model mengenai kematian atau penyakit akan disebut sebagai estimasi berbasis asumsi dan bukan hitungan langsung setiap individu yang meninggal akibat satu episode tertentu.

2. El Niño, musim kering, dan kerentanan kebakaran Indonesia

El Niño merupakan fase hangat ENSO yang berhubungan dengan perubahan suhu permukaan laut dan sirkulasi atmosfer di Pasifik ekuatorial. Perubahan tersebut menggeser lokasi konveksi dan pola hujan tropis. Dalam banyak episode, sejumlah wilayah Indonesia mengalami peluang curah hujan lebih rendah atau musim kering yang lebih panjang, tetapi besar serta waktunya berbeda antarpulau dan antartahun. BMKG

menekankan pemantauan berbagai indeks dan kondisi atmosfer, bukan hanya satu angka Niño 3.4, untuk mengantisipasi dampak regional. IOD positif dan kondisi monsun dapat menguatkan atau mengubah respons hujan. Karena itu, informasi El Niño sebaiknya dipahami sebagai sinyal risiko musiman, bukan ramalan bahwa seluruh Indonesia akan mengalami kekeringan atau kebakaran pada waktu bersamaan.

Kondisi kering menurunkan kelembapan tanah dan vegetasi. Pada lahan gambut yang telah didrainase, muka air dapat turun sehingga lapisan organik yang biasanya basah menjadi mudah terbakar. Api gambut dapat membara di bawah permukaan, sulit dideteksi dari udara, dan bertahan walaupun bagian atas lahan tampak tidak lagi menyala. Pembakaran vegetasi dan gambut melepaskan partikel serta gas dalam jumlah besar. Hubungan hujan, muka air gambut, titik panas, dan emisi bersifat nonlinier: setelah ambang kekeringan tertentu terlampaui, luas area terbakar dan emisi dapat meningkat tajam. Field et al. (2016) menunjukkan sensitivitas aktivitas kebakaran dan polusi asap Indonesia terhadap kekeringan yang terkait El Niño tidak sederhana dan cenderung nonlinier.

Kebakaran bukan proses meteorologis murni. Api dapat muncul dari pembukaan lahan, pembakaran sisa tanaman, konflik kepemilikan, pembukaan akses, atau kelalaian. Sebagian pembakaran dilakukan untuk mengurangi biaya persiapan lahan, tetapi dampak sosial dan ekologisnya melampaui lokasi pembakaran. Pada tanah mineral, api dapat membakar serasah dan vegetasi; pada gambut, kerusakan dapat lebih dalam serta menghasilkan asap pekat berkepanjangan. Konversi lahan, kanal drainase, fragmentasi hutan, dan pengeringan berulang membuat lanskap semakin mudah terbakar. Karena itu, mitigasi perlu menyasar kombinasi penyulut, kontinuitas bahan bakar, kondisi hidrologi, dan insentif yang mengatur perilaku.

Musim El Niño yang kering dapat memperbesar peluang kebakaran, tetapi tidak setiap El Niño menghasilkan krisis asap dengan skala sama. Perbedaan antara tahun-tahun kebakaran mencerminkan variasi kekuatan dan durasi kekeringan, sebaran lahan rentan, kelembapan gambut, pola angin,

kegiatan pembukaan lahan, serta kesiapan pemadaman. Kejadian 2015, misalnya, berkembang dalam konteks El Niño kuat dan IOD positif, dengan kebakaran yang luas di Sumatra dan Kalimantan. Literatur membandingkan emisi, paparan, dan risiko kesehatan dari beberapa tahun kering untuk menunjukkan besarnya kontribusi kombinasi kondisi iklim dan pengelolaan lanskap (Koplitz et al., 2016; Kiely et al., 2020). Pelajaran utamanya bukan bahwa ENSO dapat dihindari, melainkan bahwa kebakaran besar dapat dikurangi ketika lanskap dan tata kelola lebih tahan kering.

3. Dari api ke kabut asap: komposisi dan perilaku polutan

Asap kebakaran biomassa mengandung partikulat dengan ukuran beragam, karbon monoksida, karbon dioksida, nitrogen oksida, senyawa organik volatil, hidrokarbon aromatik polisiklik, dan produk pembakaran lain. Komposisi sangat bergantung pada jenis bahan bakar, suhu pembakaran, kadar air, kandungan tanah organik, dan kondisi atmosfer. Pembakaran gambut sering menjadi sumber penting partikulat halus dan senyawa hasil pembakaran tidak sempurna. Oleh sebab itu, "kabut asap" bukan satu zat tunggal. Risiko kesehatan muncul dari campuran polutan yang berubah menurut lokasi dan waktu, sedangkan instrumen pemantauan biasanya hanya mengukur sebagian komponennya.

$PM_{2.5}$ merujuk pada partikel dengan diameter aerodinamis hingga sekitar 2,5 mikrometer. Ukurannya memungkinkan partikel menembus lebih dalam ke sistem pernapasan dibanding partikel besar, walaupun karakter kimianya juga penting. PM_{10} mencakup fraksi yang lebih besar dan dapat mengendap di saluran napas bagian atas maupun bawah. Asap dapat mengandung partikel karbon, abu, senyawa organik, dan zat iritan yang memicu respons inflamasi. Karbon monoksida berbahaya karena mengganggu kemampuan darah mengangkut oksigen pada konsentrasi cukup tinggi. Risiko aktual bergantung pada konsentrasi, lama paparan, ventilasi, aktivitas, kondisi kesehatan, dan kemampuan individu menghindari udara tercemar.

Asap tidak berhenti di batas administrasi. Angin membawa polutan dari area kebakaran menuju permukiman dan kota, sementara perubahan angin dan hujan dapat mengubah konsentrasi dari hari ke hari. Asap yang terperangkap di lapisan atmosfer rendah dapat menyebabkan kualitas udara memburuk, terutama ketika sumber emisi dekat dan ventilasi atmosfer lemah. Seseorang bisa tinggal jauh dari titik api tetapi menerima paparan tinggi selama beberapa hari. Sebaliknya, titik api dekat suatu desa tidak selalu menghasilkan kadar yang sama di setiap rumah. Pemantauan perlu menggabungkan lokasi api, arah angin, estimasi emisi, sensor kualitas udara, dan kepadatan penduduk.

Kabut yang terlihat tidak selalu sebanding dengan konsentrasi $PM_{2.5}$, dan langit yang tampak lebih cerah tidak memastikan udara telah aman. Indeks standar pencemar udara (ISPU) membantu menyampaikan kondisi kualitas udara, tetapi publik perlu memahami indikator yang diukur dan rentang waktu rata-ratanya. Ketika alat pemantau tidak tersedia, prakiraan berbasis satelit atau model dapat memberi indikasi, namun ketidakpastian lokal mungkin tinggi. Informasi sebaiknya menyebut sumber, waktu pembaruan, lokasi yang dicakup, dan keterbatasan. Penyedia layanan perlu menghindari satu angka tunggal tanpa konteks, khususnya ketika pesan itu digunakan untuk menentukan penutupan sekolah atau tindakan klinis.

4. Jalur risiko kesehatan: paparan, dosis, dan kerentanan

Bahaya lingkungan tidak otomatis menjadi penyakit pada semua orang. Dampak terjadi melalui urutan bahaya, pelepasan polutan, transportasi, konsentrasi udara, kontak manusia, dosis yang masuk ke tubuh, respons biologis, dan konsekuensi klinis atau sosial. Tiap mata rantai dipengaruhi keadaan setempat. Konsentrasi di luar rumah berbeda dari konsentrasi di dalam; aktivitas fisik menentukan volume udara yang dihirup; rumah dapat menyaring sebagian partikel tetapi tidak seluruhnya; dan masker memiliki efektivitas yang berbeda tergantung jenis serta kecocokan. Kesehatan awal, usia, obat, paparan sebelumnya, dan akses layanan membentuk variasi dampak antarmanusia.

Paparan dapat bersifat akut, berulang, atau kronis. Paparan akut berlangsung selama jam atau hari dan dapat memicu iritasi, batuk, mengi, sesak, serta memperburuk penyakit yang sudah ada. Episode yang berlangsung berminggu-minggu memungkinkan paparan berulang dan pemulihan yang tidak tuntas. Pada orang dengan asma, paparan asap dapat meningkatkan kebutuhan obat pelega dan kunjungan klinis. Pada penderita penyakit jantung dan paru kronis, polusi dapat memicu dekompensasi. Panduan kualitas udara global WHO menyimpulkan bukti kuat bahwa partikulat dan sejumlah polutan lain berdampak pada kesehatan, dengan fokus pada risiko populasi dan perlindungan yang lebih luas (World Health Organization [WHO], 2021).

Respons biologis mencakup iritasi mukosa, stres oksidatif, inflamasi, perubahan fungsi pembuluh darah, dan gangguan pertukaran gas. Partikel halus mencapai bagian paru yang lebih dalam dan dapat memengaruhi jaringan paru, sementara mediator peradangan berpotensi berdampak pada sistem lain. Mekanisme ini membantu menjelaskan mengapa bukti kesehatan tidak hanya berkaitan dengan batuk atau ISPA. Namun, mekanisme biologis tidak berarti bahwa semua luaran dapat diatribusikan secara pasti pada satu paparan asap. Kesimpulan kausal memerlukan pengukuran paparan yang baik, data kesehatan yang memadai, pengendalian faktor perancu, dan metode epidemiologi yang sesuai.

Kerentanan adalah hasil interaksi antara sensitivitas dan kapasitas menghindari atau mengurangi paparan. Anak mungkin lebih rentan karena paru dan sistem kekebalan masih berkembang serta mereka menghirup lebih banyak udara relatif terhadap ukuran tubuh ketika aktif. Lansia lebih sering memiliki penyakit kronis dan keterbatasan mobilitas. Ibu hamil menghadapi kebutuhan kesehatan khusus. Pekerja luar ruang dan pedagang tidak selalu dapat tinggal di dalam rumah. Keluarga berpenghasilan rendah mungkin tidak mampu membeli masker yang sesuai, alat penyaring, atau kehilangan pendapatan karena tidak bekerja. Masyarakat terdampak kebakaran dapat mengalami paparan berlapis, kehilangan rumah atau mata pencaharian, dan hambatan akses layanan.

5. Dampak akut pada saluran pernapasan

Keluhan akut yang umum selama kabut asap meliputi mata, hidung, dan tenggorokan perih; batuk; produksi dahak; suara serak; sesak; mengi; dan rasa berat di dada. Keluhan dapat berbeda menurut konsentrasi, lama paparan, aktivitas fisik, serta riwayat kesehatan. Bagi orang yang sebelumnya sehat, gejala mungkin mereda setelah paparan menurun, tetapi hal itu tidak menghapus potensi dampak terhadap orang dengan penyakit paru. Episode asap dapat meningkatkan penggunaan obat, konsultasi, atau rawat inap, meskipun kecenderungan tersebut tidak selalu terlihat di setiap rumah sakit karena perbedaan akses dan pencatatan.

Asma merupakan contoh kondisi yang sensitif terhadap iritan udara. Paparan dapat meningkatkan inflamasi saluran napas dan memicu bronkospasme pada sebagian pasien. Penderita mungkin merasakan gejala saat bermain, berjalan, atau bekerja di luar. Rencana tindakan asma yang telah disepakati dengan tenaga kesehatan membantu keluarga mengetahui kapan menggunakan terapi yang diresepkan dan kapan mencari pertolongan. Pasien tidak seharusnya mengubah dosis atau menghentikan obat pengendali tanpa berkonsultasi. Fasilitas kesehatan dapat mengantisipasi peningkatan kebutuhan inhaler, nebulisasi, dan konsultasi saat episode asap.

Pada penyakit paru obstruktif kronis (PPOK), berkurangnya cadangan pernapasan membuat perburukan akut lebih berbahaya. Paparan dapat meningkatkan sesak, batuk, produksi dahak, dan risiko eksaserbasi. Lansia atau pasien dengan PPOK mungkin kesulitan mencapai fasilitas kesehatan ketika transportasi terganggu atau udara luar buruk. Program pemantauan pasien kronis perlu memasukkan rencana komunikasi jarak jauh, pasokan obat, serta jalur rujukan. Tenaga kesehatan dapat membantu mengenali tanda memburuk yang memerlukan evaluasi segera dan membedakan perburukan penyakit dari keluhan ringan sementara.

Hubungan antara asap dan infeksi saluran pernapasan perlu dipaparkan hati-hati. Paparan iritan dapat mengganggu pertahanan saluran napas dan

meningkatkan gejala, sedangkan kejadian ISPA juga dipengaruhi patogen, kepadatan hunian, gizi, sanitasi, dan perilaku mencari layanan. Data kunjungan klinik pada saat asap meningkat dapat berubah karena warga menghindari perjalanan, bukan semata karena penyakit menurun. Studi Indonesia mengenai penggunaan layanan pada kebakaran 2015 menemukan pola yang berbeda berdasarkan usia dan lokasi; anak kecil di wilayah urban menunjukkan peningkatan kunjungan primer untuk keluhan pernapasan, sementara sebagian pola pemanfaatan rumah sakit tidak meningkat secara seragam (Sambodo et al., 2024). Ini menunjukkan pentingnya membaca data layanan bersama informasi akses dan paparan.

6. Sistem kardiovaskular, kehamilan, dan masa awal kehidupan

Partikel halus dan polutan lain dapat memengaruhi sistem kardiovaskular melalui peradangan sistemik, stres oksidatif, perubahan fungsi pembuluh darah, pembekuan, dan kendali otonom jantung. Pada individu dengan penyakit jantung koroner atau gagal jantung, kondisi tersebut dapat berkontribusi pada gejala atau kejadian akut. Bukti dari berbagai konteks menunjukkan hubungan polusi partikulat dengan penyakit kardiovaskular, namun besar risiko spesifik asap gambut di setiap wilayah Indonesia masih memerlukan pengukuran yang lebih baik. Rumah sakit perlu memasukkan kemungkinan paparan asap dalam anamnesis pasien dengan nyeri dada, sesak, atau perburukan penyakit jantung selama episode polusi.

Kehamilan merupakan tahap kehidupan dengan konsekuensi kesehatan yang luas. Janin berkembang dalam lingkungan yang dipengaruhi kondisi ibu, sehingga paparan polutan dapat berhubungan dengan pertumbuhan janin, kelahiran prematur, berat lahir, dan kesehatan awal anak. Studi yang meneliti kebakaran Indonesia 1997 melaporkan hubungan antara paparan prenatal terhadap polusi kebakaran dan ukuran tubuh anak pada masa remaja, yang menunjukkan potensi konsekuensi jangka panjang masa awal kehidupan (Tan-Soo & Pattanayak, 2019). Temuan tersebut penting tetapi tidak boleh disederhanakan menjadi kesimpulan bahwa satu paparan menyebabkan luaran yang sama bagi semua kehamilan. Desain studi,

kualitas estimasi paparan, faktor sosial, dan rentang waktu perlu dipertimbangkan.

Studi kohort dan analisis sejarah kebakaran 1997 juga memberi bukti mengenai kerentanan kesehatan orang dewasa dan anak. Frankenberg et al. (2005) menggunakan data longitudinal dan ukuran aerosol satelit untuk menilai perubahan kesehatan setelah paparan kabut asap, menemukan dampak negatif pada sejumlah dimensi kesehatan, meskipun beberapa luaran memerlukan interpretasi lebih hati-hati. Jayachandran (2009) memperkirakan dampak asap terhadap kematian dini bayi melalui pola kelahiran yang tidak teramati dalam data sensus; hasilnya mengindikasikan bahwa paparan prenatal merupakan jalur penting. Angka yang diturunkan melalui metode demografis dan model bukan daftar individu yang diverifikasi meninggal akibat asap, tetapi memberi bukti kuantitatif bahwa dampak dapat melampaui gejala akut.

Bagi ibu hamil, tindakan perlindungan perlu menghindari pesan yang menyalahkan atau membebani keluarga. Pemeriksaan antenatal dapat mencakup pertanyaan mengenai pekerjaan di luar ruang, kondisi rumah, gejala pernapasan, dan akses ke tempat yang lebih bersih udaranya. Puskesmas perlu memberi saran berdasarkan kualitas udara dan kondisi individu, mengidentifikasi gejala yang perlu segera dinilai, dan menyiapkan kesinambungan pelayanan persalinan. Kebijakan ketenagakerjaan seharusnya mempertimbangkan pekerja hamil yang terpapar asap, termasuk opsi perubahan tugas atau lokasi jika mungkin, tanpa mengurangi hak dan pendapatan secara tidak adil.

7. Anak, remaja, dan kesehatan perkembangan

Anak-anak menghabiskan waktu di sekolah, bermain di luar, melakukan perjalanan ke kelas, dan tinggal bersama keluarga di rumah yang mungkin terpapar asap. Mereka tidak selalu memiliki kendali untuk menutup jendela, memakai pelindung, atau meninggalkan lingkungan. Sistem pernapasan yang berkembang dan aktivitas fisik yang tinggi membuat perlindungan sekolah penting. Namun penutupan sekolah yang berkepanjangan juga

membawa konsekuensi belajar, gizi, pengawasan, dan kesejahteraan. Oleh karena itu, keputusan harus mempertimbangkan kualitas udara, prakiraan, kondisi bangunan, akses pembelajaran alternatif, dan kemampuan keluarga.

Sekolah dapat mengembangkan protokol kualitas udara yang sederhana: memantau informasi resmi, menentukan kapan aktivitas fisik luar ruang dikurangi atau dihentikan, menjaga ruang kelas sejauh mungkin dari masuknya asap, menyediakan air minum, dan menghubungi keluarga bila anak menunjukkan gejala. Anak dengan asma atau penyakit lain memerlukan rencana individual yang disepakati orang tua dan tenaga kesehatan. Guru perlu mengetahui tanda bahaya dan mekanisme rujukan, tetapi tidak menggantikan penilaian medis. Sekolah juga perlu memperhatikan siswa yang tinggal dekat sumber kebakaran atau tidak memiliki ruang bersih di rumah, karena ketimpangan paparan tidak berakhir saat mereka memasuki kelas.

Paparan masa kecil dapat memengaruhi lebih dari fungsi paru jangka pendek. Gangguan tidur, absensi sekolah, berkurangnya aktivitas fisik, dan stres keluarga dapat berdampak pada kesejahteraan. Pengalaman krisis yang berulang juga dapat membentuk persepsi anak terhadap lingkungan dan rasa aman. Penelitian Tan-Soo dan Pattanayak (2019) menyoroti hubungan paparan prenatal pada kebakaran 1997 dengan pertumbuhan anak di masa kemudian, sementara penelitian tentang kesehatan jangka panjang tetap perlu melanjutkan pelacakan kohort dengan pengukuran paparan dan faktor sosial yang lebih rinci. Data tersebut mendukung strategi pencegahan sejak sebelum konsepsi hingga masa kanak-kanak.

Intervensi anak harus berorientasi pada keluarga. Informasi disampaikan dalam bahasa yang mudah, tidak menakut-nakuti, dan memberi langkah konkret. Puskesmas, posyandu, sekolah, layanan perlindungan anak, serta organisasi masyarakat dapat mengidentifikasi keluarga yang memiliki bayi, anak dengan penyakit kronis, atau keterbatasan akses. Apabila masker digunakan, edukasi perlu menjelaskan bahwa produk harus pas dan sesuai usia; masker tidak menggantikan pengurangan paparan, ventilasi bersih,

atau perawatan medis. Bagi anak kecil, keselamatan penggunaan masker dan pengawasan orang dewasa perlu menjadi pertimbangan.

8. Lansia, penyakit kronis, dan disabilitas

Lansia dengan penyakit paru, jantung, diabetes, gangguan ginjal, atau demensia dapat menghadapi beban lebih besar ketika kabut asap muncul. Gejala awal mungkin tidak dilaporkan atau dianggap sebagai bagian dari penyakit lama. Gangguan pendengaran atau kognitif dapat menyulitkan pemahaman informasi. Seseorang yang tinggal sendiri mungkin tidak memiliki orang untuk membeli obat, menutup bukaan rumah yang menghadap asap, atau mengantarkannya ke klinik. Program kesiapsiagaan perlu memetakan jaringan sosial, bukan hanya menghitung jumlah lansia di suatu wilayah.

Penyandang disabilitas dapat bergantung pada alat bantu, pengasuh, transportasi khusus, atau pasokan listrik. Rencana perlindungan perlu memeriksa apakah tempat pengungsian atau ruang udara bersih dapat diakses, apakah informasi tersedia dalam format yang sesuai, dan siapa yang bertanggung jawab membantu mobilitas. Orang dengan gangguan pernapasan atau kondisi neurologis mungkin mempunyai kebutuhan klinis khusus. Diskusi perencanaan sebaiknya melibatkan organisasi penyandang disabilitas sejak awal agar prosedur tidak dibuat dengan asumsi bahwa semua orang dapat berjalan cepat, membaca teks kecil, atau menerima pesan suara standar.

Pasien penyakit kronis membutuhkan kesinambungan pengobatan ketika kabut asap mengganggu transportasi dan pelayanan. Apotek dan fasilitas kesehatan dapat memeriksa persediaan obat rutin serta rencana pengantaran bagi pasien tertentu. Pasien yang menggunakan oksigen atau alat medis harus memiliki panduan terkait penggunaan di lingkungan berasap dan prosedur saat listrik padam. Tenaga kesehatan dapat meninjau faktor risiko dan rencana terapi sebelum musim kering. Pasien harus diberi tahu agar tidak mengubah obat sendiri, khususnya obat jantung atau obat yang memengaruhi saluran napas.

Studi tentang paparan jangka panjang $PM_{2.5}$ di Sumatra melaporkan hubungan dengan mortalitas alami, kardiovaskular, dan pernapasan, meskipun estimasi bergantung pada model paparan satelit dan rancangan kohort (Siregar et al., 2024). Temuan ini mengingatkan bahwa kebijakan udara bersih tidak hanya relevan pada minggu ketika kabut terlihat, tetapi juga pada keseluruhan lingkungan paparan. Namun, analisis jangka panjang perlu memisahkan kontribusi kebakaran dari transportasi, industri, pembakaran domestik, dan sumber lain untuk merancang solusi yang efektif.

9. Pekerja, masyarakat sekitar kebakaran, dan kesehatan mental

Pekerja lapangan, petugas pemadam, petani, buruh perkebunan, pengemudi, pedagang, pekerja konstruksi, serta petugas kebersihan dapat menghabiskan jam kerja di luar ruang saat kualitas udara memburuk. Berhenti bekerja sering berarti kehilangan upah, khususnya bagi pekerja harian dan informal. Sebagian pekerja tidak mempunyai pilihan untuk pindah ke ruang tertutup yang lebih bersih. Perlindungan harus memasukkan penyesuaian jam atau tugas, jeda, ruang istirahat, ketersediaan respirator yang tepat ketika diperlukan, pelatihan, pemantauan kesehatan, dan mekanisme pelaporan tanpa pembalasan. Masker kain tipis tidak boleh dipromosikan seolah memberi perlindungan setara respirator yang sesuai.

Petugas pemadaman menghadapi risiko khusus karena berada dekat api dan menghirup asap dengan konsentrasi tinggi, disertai panas, kerja berat, dan kemungkinan cedera. Mereka membutuhkan peralatan sesuai bahaya, pelatihan, sistem teman, komunikasi radio, pertolongan pertama, pemeriksaan kesehatan, dan prosedur pergantian personel. Peralatan pelindung harus disesuaikan dengan pekerjaan dan risiko, serta digunakan setelah pelatihan yang cukup. Petugas komunitas yang membantu pemadaman secara sukarela juga perlu mendapat perlindungan; tanggung jawab negara dan perusahaan tidak dapat dialihkan begitu saja kepada warga.

Masyarakat sekitar kebakaran dapat mengalami paparan asap sekaligus ancaman langsung terhadap rumah, kebun, ternak, dan sumber air. Evakuasi dapat memisahkan keluarga dan mengganggu akses obat, dokumen, serta layanan persalinan. Kerugian mata pencaharian dan ketidakpastian berulang dapat menimbulkan stres, kecemasan, gangguan tidur, atau rasa kehilangan. Bukti kesehatan mental khusus tentang setiap episode asap di Indonesia belum merata, sehingga respons perlu menggabungkan pemantauan psikososial dan dukungan tanpa membuat klaim prevalensi yang belum terukur.

Perlindungan pekerja dan komunitas perlu dirancang bersama masyarakat yang mengalami risiko. Forum desa dapat membahas waktu aktivitas, lokasi berlindung, kebutuhan informasi, dan jalur transportasi. Perusahaan harus membuka data risiko dan menyediakan mekanisme pengaduan. Pemerintah daerah dapat bekerja dengan serikat pekerja, koperasi, organisasi perempuan, dan kelompok disabilitas. Pendekatan partisipatif membantu memastikan kebijakan dapat dijalankan dalam kondisi kerja nyata dan tidak sekadar memindahkan biaya perlindungan dari pelaku usaha atau pemerintah kepada rumah tangga.

10. Dampak sosial, ekonomi, pendidikan, dan layanan kesehatan

Kabut asap mengganggu kegiatan ekonomi melalui berkurangnya jam kerja, absensi, gangguan penerbangan dan transportasi, penurunan pariwisata, dan meningkatnya biaya layanan kesehatan. Dampak paling berat dapat dirasakan pekerja informal yang tidak memperoleh cuti berbayar atau kompensasi. Keluarga juga menanggung biaya masker, transportasi, obat, dan kehilangan pendapatan. Dampak ekonomi sering menyebar ke wilayah yang tidak terbakar karena asap bergerak melintasi kawasan dan rantai pasok terganggu. Perhitungan kerugian nasional seharusnya memasukkan biaya kesehatan, pendidikan, produktivitas, kerusakan ekosistem, dan beban yang ditanggung rumah tangga.

Gangguan sekolah dapat berupa pembatasan aktivitas luar ruang, penutupan sementara, perubahan jadwal, atau beralih ke pembelajaran

jarak jauh. Efektivitas respons berbeda menurut akses listrik, internet, perangkat, dan ruang belajar di rumah. Penutupan mungkin menurunkan paparan di sekolah, tetapi menambah paparan di rumah bagi anak yang tinggal di kawasan lebih tercemar. Keputusan perlu berbasis kondisi lokal dan memberikan alternatif bagi keluarga. Dampak terhadap gizi juga perlu diperhatikan apabila sekolah menyediakan makanan bagi anak dari keluarga rentan.

Fasilitas kesehatan dapat menghadapi peningkatan pasien bersamaan dengan gangguan listrik, kualitas udara dalam ruang, pasokan oksigen, dan transportasi rujukan. Rumah sakit yang berada di area terdampak mungkin harus merawat pasien pernapasan sementara stafnya sendiri terpapar. Puskesmas dapat kehilangan kapasitas jika pegawai tidak dapat bepergian. Rencana kesinambungan layanan perlu mencakup sistem ventilasi dan filtrasi, stok obat, pasokan energi, air, perlindungan staf, layanan ibu-anak, pengiriman resep, komunikasi rujukan, dan pengaturan jadwal. Pelayanan rutin seperti imunisasi dan pengobatan hipertensi sebaiknya tidak berhenti tanpa rencana pengganti.

Kajian Koplitz et al. (2016) memperkirakan sekitar 100.300 kematian prematur terkait paparan asap pada 2015 di Indonesia, Malaysia, dan Singapura, termasuk sekitar 91.600 di Indonesia, berdasarkan model atmosfer dan fungsi risiko kesehatan. Kiely et al. (2020) menggunakan pendekatan pemodelan berbeda untuk episode kebakaran 2004–2015 dan mengestimasi beban kesehatan jangka panjang dari paparan partikulat. Angka-angka tersebut bukan pencatatan sebab kematian satu per satu dan ketidakpastiannya lebar. Perbedaan asumsi, sumber data, model transportasi asap, dan fungsi konsentrasi-respons dapat menghasilkan hasil berbeda. Angka itu berguna untuk menunjukkan skala potensi dampak serta nilai pencegahan, bukan sebagai hitungan pasti yang dapat disamakan dengan statistik kematian resmi.

11. Kasus sejarah: 1997, 2015, dan 2019

Episode 1997 menjadi salah satu bencana kabut asap besar yang memberi pelajaran mengenai hubungan kekeringan, konversi lahan, dan kesehatan. Studi Kunii et al. (2002) menilai kualitas udara dan kesehatan selama bencana tersebut, menemukan konsentrasi sejumlah polutan dan partikulat yang sangat tinggi di lokasi penelitian serta keluhan pernapasan yang luas di antara responden. Studi ini juga mencatat kesehatan lansia dan penderita asma memerlukan perhatian khusus. Sebagai penelitian lapangan pada lokasi serta sampel tertentu, temuannya tidak boleh digeneralisasi sebagai prevalensi nasional, tetapi menjadi bukti langsung tentang pengalaman paparan dan gejala.

Analisis demografis dan longitudinal memperluas pemahaman tentang dampak 1997. Frankenberg et al. (2005) menggunakan survei longitudinal untuk membandingkan perubahan kesehatan individu di wilayah terpapar dan tidak terpapar. Jayachandran (2009) memanfaatkan pola spasial-temporal polusi dan data sensus untuk mengestimasi dampak terhadap kematian awal kehidupan. Tan-Soo dan Pattanayak (2019) mengaitkan paparan prenatal pada 1997 dengan indikator pertumbuhan anak pada usia lebih tua. Masing-masing studi memiliki desain, proksi paparan, serta asumsi yang berbeda; bersama-sama, mereka menunjukkan bahwa penilaian risiko perlu melampaui hitungan konsultasi pada saat kabut terjadi.

Kebakaran 2015 terjadi ketika El Niño kuat dan kondisi kering berkepanjangan meningkatkan kerentanan lanskap di beberapa wilayah. Asap menyebar luas dan berlangsung lama. Koplitz et al. (2016) mengembangkan kerangka model untuk menghubungkan kebakaran, transportasi asap, konsentrasi $PM_{2.5}$, dan estimasi dampak kesehatan di kawasan ekuatorial Asia. Hasilnya memberi contoh bagaimana emisi provinsi tertentu dapat memengaruhi paparan lintas batas. Pendekatan pemodelan berguna ketika pengukuran lapangan terbatas, tetapi tetap bergantung pada ketepatan emisi, transportasi atmosfer, distribusi penduduk, dan fungsi risiko.

Episode 2019 kembali memperlihatkan besarnya kontribusi pembakaran gambut. Grosvenor et al. (2024) memadukan pengukuran sensor berbiaya rendah di sekitar Palangka Raya dengan penilaian kualitas udara dan estimasi dampak kesehatan. Penulis melaporkan tingkat polusi yang ekstrem dan memperkirakan dampak kesehatan substansial di Kalimantan Tengah serta secara nasional, sambil menekankan perlunya mengurangi penggunaan api dan memulihkan bentang gambut. Estimasi kematian dalam penelitian tersebut tetap merupakan hasil analisis dampak, bukan daftar terverifikasi individu. Perbandingan antar-episode membantu mengidentifikasi kegagalan berulang sekaligus menunjukkan bahwa peningkatan pemantauan lokal dapat memperbaiki kesiapsiagaan.

12. Bukti epidemiologis dan batas penafsirannya

Penelitian epidemiologi kabut asap menggunakan beragam rancangan: survei gejala, data klinik harian, catatan rawat inap, kohort, data sensus, pengukuran satelit, pemodelan kimia atmosfer, dan fungsi risiko. Setiap rancangan menjawab pertanyaan berbeda. Survei dapat menangkap keluhan yang tidak dibawa ke layanan, tetapi rentan bias ingatan. Data rumah sakit menunjukkan beban pasien yang datang, namun tidak mencakup semua warga sakit. Studi kohort dapat menguji dampak jangka panjang, tetapi membutuhkan pengukuran paparan dan pengendalian faktor perancu. Model dapat memperkirakan dampak di wilayah tanpa pemantauan, tetapi hasil sensitif pada asumsi dan input.

Pengukuran paparan merupakan tantangan penting. Stasiun pemantauan mungkin sedikit dan terletak di kota, sehingga variasi desa, rumah, sekolah, dan tempat kerja tidak tercakup. Aerosol optical depth satelit mengukur sifat optik kolom atmosfer dan tidak identik dengan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang dihirup manusia di permukaan. Model kimia transportasi memperkirakan distribusi polutan, tetapi kualitasnya dipengaruhi emisi kebakaran dan meteorologi. Sensor biaya rendah memperluas cakupan, namun memerlukan kalibrasi, pemeliharaan, dan evaluasi terhadap kelembapan tinggi serta karakter partikel lokal.

Perancu dapat muncul dari suhu, musim penyakit, perubahan perilaku, kondisi ekonomi, akses layanan, polusi sumber lain, dan perpindahan penduduk. Pada periode asap, orang mungkin mengurangi aktivitas luar ruang atau memakai masker, sehingga dosis personal tidak sama dengan konsentrasi luar ruang. Rumah tangga yang mampu meninggalkan daerah terdampak juga berbeda dari yang bertahan. Studi yang tidak mempertimbangkan faktor-faktor ini berisiko salah mengestimasi besaran dampak. Desain penelitian perlu memadukan metode kuantitatif dan kualitatif untuk mengetahui bukan hanya apakah kunjungan berubah, tetapi juga siapa yang tidak datang dan mengapa.

Interpretasi angka kematian prematur membutuhkan kehati-hatian khusus. Studi dampak kesehatan mengalikan estimasi paparan dengan fungsi risiko yang diperoleh dari literatur epidemiologi dan jumlah populasi. Kematian yang diperkirakan adalah perubahan probabilistik pada tingkat populasi, bukan penetapan sebab kematian pada individu. Interval ketidakpastian dapat sangat lebar. Meski demikian, estimasi bukan berarti tidak berguna. Ia dapat membandingkan skenario, menunjukkan konsekuensi kesehatan yang berpotensi dicegah, dan memasukkan manfaat kesehatan ke dalam evaluasi kebijakan. Pelaporan perlu menyatakan sumber ketidakpastian, kelompok yang dianalisis, durasi paparan, dan jenis luaran.

13. Kualitas udara, indeks, dan sistem peringatan kesehatan

Pemantauan yang bermanfaat harus menjawab kebutuhan keputusan: di mana kualitas udara memburuk, berapa lama episode mungkin berlangsung, kelompok apa yang paling terpapar, dan tindakan apa yang akan diaktifkan. Stasiun tetap memberi pengukuran yang stabil pada lokasi tertentu, sedangkan sensor bergerak dan sensor biaya rendah dapat mengisi kekosongan spasial. Data satelit membantu mendeteksi titik panas dan aerosol, dan model dapat memperkirakan pergerakan plume. Semua sumber memiliki keterbatasan. Sistem perlu menyajikan data menurut waktu dan tempat, menandai estimasi atau observasi, serta menjaga dokumentasi mutu.

ISPU atau indeks kualitas udara menyederhanakan informasi teknis untuk publik, tetapi angka indeks dapat membingungkan bila metodologi, polutan dominan, dan rata-rata waktunya tidak dijelaskan. Sebagian warga memerlukan pesan yang langsung memberi tindakan, misalnya mengurangi aktivitas luar ruang atau mencari layanan ketika gejala berat. Peringatan harus didasarkan pada kombinasi pengukuran, prakiraan kebakaran, angin, dan bukti kesehatan. Ambang tindakan sebaiknya disusun bersama ahli, otoritas, fasilitas kesehatan, sekolah, pekerja, dan masyarakat terdampak. Ambang tidak boleh menjadi alasan menunda perlindungan ketika terdapat bukti konsisten tentang asap yang berbahaya.

Sistem peringatan dini kesehatan perlu menghubungkan prakiraan El Niño dan kekeringan dengan pencegahan kebakaran serta kesiapan layanan. Prakiraan musiman memberi waktu untuk menyiapkan pompa, sekat kanal, patroli, sarana pemadaman, komunikasi, masker respirator untuk petugas yang sesuai, persediaan obat, dan protokol sekolah. Prakiraan jangka pendek dapat membantu mengaktifkan respons lokal. Mekanisme harus menyebut siapa yang bertanggung jawab menerima sinyal dan mengambil keputusan. Peringatan yang tidak diikuti sumber daya atau tindakan jelas hanya menambah kecemasan. WHO juga menempatkan pengurangan paparan asap dan kesiapsiagaan sistem kesehatan sebagai unsur penting dalam perlindungan populasi selama kebakaran vegetasi (WHO, n.d.).

Peringatan berbasis dampak lebih berguna daripada menyebarkan nilai konsentrasi tanpa konteks. Pesan dapat menyatakan bahwa kelompok tertentu perlu mengurangi paparan, kegiatan apa yang ditunda, apakah fasilitas membuka layanan, dan di mana bantuan tersedia. Sistem sebaiknya memperhatikan bahasa lokal, akses bagi penyandang disabilitas, konektivitas, dan kanal yang masih bekerja ketika jaringan internet terganggu. Kepercayaan meningkat jika pembaruan teratur, sumber informasi konsisten, kesalahan dikoreksi secara terbuka, dan masyarakat dilibatkan dalam evaluasi setelah episode berakhir.

14. Perlindungan individu dan keluarga tanpa memindahkan tanggung jawab

Rumah tangga dapat mengurangi paparan dengan membatasi aktivitas luar ruang pada saat polusi tinggi, menutup bukaan ketika plume asap melintas, dan menjaga satu ruang yang relatif bersih bila memungkinkan. Namun, menutup rumah sepenuhnya tanpa ventilasi atau pendinginan dapat menimbulkan masalah lain, terutama di daerah panas dan padat. Filter udara portabel dapat membantu jika ukuran ruang, pemeliharaan, dan pasokan listrik sesuai, tetapi aksesnya tidak merata. Pesan publik harus menjelaskan keterbatasan pilihan tersebut dan mengutamakan pengurangan sumber emisi sebagai perlindungan utama.

Respirator partikulat yang pas dapat mengurangi sebagian paparan partikel, tetapi tidak semua masker menyaring partikel dengan baik dan respirator tidak menghilangkan gas berbahaya. Kecocokan pada wajah penting; rambut wajah, ukuran, kebocoran, kenyamanan, dan penggunaan lama memengaruhi kinerja. Masker mungkin tidak sesuai bagi bayi atau individu tertentu dan dapat memperberat ketidaknyamanan. Karena itu, publik perlu mendapat panduan resmi sesuai kelompok, dan masker tidak boleh dijadikan pengganti ruang bersih, pembatalan kerja luar ruang, atau perawatan medis. Pemerintah perlu memastikan akses bagi kelompok berpenghasilan rendah jika masker direkomendasikan sebagai bagian respons.

Keluarga dengan pasien asma atau penyakit jantung dapat menyiapkan obat resep, nomor layanan, dokumen medis, dan rencana transportasi. Obat harus digunakan menurut instruksi tenaga kesehatan, dan pasien tidak boleh mengubah terapi atas dasar pesan media sosial. Orang dengan gejala berat seperti sesak yang memburuk, kebiruan, nyeri dada, kebingungan, atau penurunan kesadaran memerlukan pertolongan segera. Daftar gejala dan jalur layanan harus disesuaikan dengan arahan klinis nasional dan daerah. Kesiapan rumah tangga sebaiknya sederhana, terjangkau, dan dipraktikkan sebelum kabut terjadi.

Imbauan perlindungan individu akan gagal bila masyarakat tidak memiliki pilihan. Petani yang harus bekerja untuk membeli makanan, orang tua yang menjaga anak di rumah tanpa ruang aman, dan pedagang tanpa upah tetap tidak dapat mengikuti saran tinggal di dalam rumah. Perlindungan efektif memerlukan dukungan sosial, cuti atau penyesuaian tugas, akses transportasi, ruang bersih publik, suplai obat, dan informasi yang dapat ditindaklanjuti. Tanggung jawab utama mencegah kebakaran tetap berada pada pemerintah, pemegang konsesi, dan aktor yang mengelola lanskap sesuai kewenangannya; keluarga berhak menerima dukungan, bukan hanya instruksi.

15. Kesiapsiagaan fasilitas kesehatan dan kesinambungan layanan

Rumah sakit dan puskesmas perlu memiliki rencana kesiapsiagaan kabut asap yang terhubung dengan rencana bencana dan kesinambungan operasi. Rencana mencakup pemantauan kualitas udara, triase, definisi kasus, jalur rujukan, komunikasi publik, perlindungan staf, ruang perawatan, dan pengelolaan pasien berisiko tinggi. Fasilitas perlu mengidentifikasi ruang dengan ventilasi dan filtrasi yang memadai serta area yang berpotensi menerima masuknya asap. Fasilitas yang tidak memiliki sistem filtrasi khusus harus memiliki rencana realistis untuk mengurangi masuknya polutan tanpa mengorbankan keselamatan ventilasi infeksi.

Rantai pasok dan infrastruktur harus diuji. Listrik dibutuhkan untuk ventilasi, filtrasi, komunikasi, penyimpanan obat tertentu, serta alat medis. Air diperlukan untuk kebersihan dan perawatan. Gangguan transportasi dapat menunda rujukan dan pengiriman oksigen atau obat. Fasilitas perlu mengevaluasi cadangan listrik, ketersediaan bahan bakar, kapasitas genset, pemeliharaan filter, dan jalur alternatif. Puskesmas terpencil mungkin membutuhkan radio, layanan telepon cadangan, dan koordinasi kendaraan desa. Persiapan ini juga bermanfaat untuk banjir, badai, dan keadaan darurat lain.

Tenaga klinis perlu dilatih mengenali gejala akibat asap, menilai pasien dengan penyakit kronis, serta membedakan kebutuhan rawat jalan dan

darurat. Pelatihan harus dilengkapi protokol yang bisa digunakan ketika ruang penuh dan pasien terus datang. Sistem informasi dapat memantau tren gejala di puskesmas dan rumah sakit, tetapi interpretasi harus memperhitungkan perubahan akses serta hari pelayanan. Kader dan layanan primer dapat menjaga kontak dengan pasien lansia atau kelompok yang sulit datang ke fasilitas. Rencana persalinan, imunisasi, dialisis, terapi oksigen, dan pengobatan rutin harus memiliki opsi keberlanjutan.

Keselamatan petugas kesehatan merupakan bagian dari keselamatan pasien. Staf dapat mengalami paparan ketika bepergian, bekerja di ruang terbuka, atau masuk-keluar fasilitas. Rumah sakit perlu menyediakan informasi risiko, masker yang sesuai untuk tugas, ruang istirahat, pemeriksaan gejala, serta kebijakan kerja ketika staf sakit. Ketersediaan tenaga pengganti penting agar perlindungan staf tidak menyebabkan layanan runtuh. Fasilitas perlu berkoordinasi dengan dinas kesehatan untuk mendapatkan dukungan personel, logistik, dan informasi kualitas udara yang konsisten.

16. Pencegahan kebakaran, pengelolaan gambut, dan manfaat kesehatan

Pencegahan kebakaran adalah intervensi kesehatan masyarakat karena mengurangi emisi sebelum polutan memasuki tubuh. Pengelolaan gambut basah melalui pembasahan kembali, penutupan kanal tertentu, pemulihan hidrologi, dan pengawasan dapat mengurangi kondisi mudah terbakar. Intervensi perlu disesuaikan dengan topografi, tata guna lahan, kebutuhan masyarakat, dan sistem air. Restorasi yang dirancang tanpa konsultasi dapat mengganggu akses, produksi pangan, atau hak masyarakat. Karena itu, kebijakan hidrologi perlu didampingi penguatan mata pencaharian, penyelesaian konflik tenurial, dan pemantauan jangka panjang.

Praktik tanpa bakar memerlukan solusi agronomi dan insentif yang memungkinkan petani menyiapkan lahan tanpa biaya atau tenaga yang tidak terjangkau. Bantuan alat, pelatihan, pengelolaan residu tanaman, akses pembiayaan, koperasi, dan pasar dapat membuat pilihan alternatif

lebih realistis. Larangan tanpa dukungan dapat mendorong praktik tersembunyi dan memperberat petani kecil, sementara aktor besar mampu memindahkan biaya. Penegakan harus adil, transparan, dan berdasarkan bukti; investigasi perlu membedakan penyebab, pelaku, serta kepentingan ekonomi dalam kebakaran.

Manajemen kebakaran berbasis masyarakat dapat membantu deteksi dini, patroli, pemantauan muka air, dan komunikasi lokal. Kelompok masyarakat membutuhkan pelatihan, alat keselamatan, perlindungan hukum, dukungan anggaran, serta koordinasi dengan pemadam profesional. Sukarelawan tidak boleh dikirim memadamkan kebakaran gambut besar tanpa perlengkapan dan kompetensi. Program perlu menghargai pengetahuan lokal, tetapi juga tidak boleh mengalihkan kewajiban negara kepada masyarakat yang paling rentan. Keterlibatan harus memberi ruang pengambilan keputusan dan manfaat yang adil bagi komunitas.

Manfaat kesehatan dari pencegahan kebakaran dapat dihitung sebagai pengurangan hari paparan, kunjungan, gangguan kerja, dan risiko kematian prematur. Analisis biaya-manfaat perlu memasukkan layanan kesehatan, produktivitas, pendidikan, transportasi, ekosistem, karbon, dan kesejahteraan komunitas. Hasil pemodelan tidak boleh dijadikan satu-satunya dasar karena nilai kesehatan dan distribusi dampak tidak selalu tergambar dalam angka ekonomi. Namun menunjukkan manfaat kesehatan dapat membantu menghubungkan kebijakan gambut dengan agenda pembangunan, pembiayaan iklim, dan tanggung jawab korporasi.

17. Tata kelola, keadilan lingkungan, dan kerja sama lintas batas

Asap bergerak lintas batas administratif dan negara, sedangkan kewenangan untuk mengendalikan sumber berada di lokasi kebakaran. Kerja sama regional diperlukan untuk berbagi data, sistem prakiraan, riset, dan bantuan teknis. Namun kerja sama internasional tidak menggantikan tanggung jawab domestik atas pencegahan, pengawasan lahan, dan penegakan hukum. Akuntabilitas perlu menelusuri siapa yang memiliki atau mengelola lahan, bagaimana izin diberikan, siapa yang memantau, dan

bagaimana pemulihan dilaksanakan. Mekanisme sengketa dan tanggung jawab lintas batas perlu berfokus pada perlindungan masyarakat dan pengurangan risiko nyata.

Keadilan lingkungan memerlukan pengakuan bahwa manfaat pembukaan lahan dapat dinikmati oleh aktor ekonomi, sementara biaya kesehatan dan lingkungan ditanggung warga lokal serta wilayah tetangga. Masyarakat adat dan komunitas lokal perlu dilibatkan dalam keputusan yang memengaruhi wilayah hidup dan mata pencaharian. Informasi kebakaran, konsesi, kualitas udara, dan hasil penegakan perlu tersedia dengan cara yang dapat dipahami. Perlindungan whistleblower dan akses pengaduan dapat membantu mendeteksi pembakaran yang tidak terlaporkan. Kebijakan yang transparan memperkuat kepercayaan dan mencegah beban hanya jatuh kepada petani kecil.

Pemerintah pusat dan daerah perlu mengintegrasikan kebijakan kesehatan, kehutanan, lingkungan hidup, pertanian, pekerjaan, pendidikan, dan penanggulangan bencana. Koordinasi harus memiliki komando yang jelas ketika indeks kualitas udara memburuk, pembiayaan yang dapat segera digunakan, dan mekanisme peninjauan setelah kejadian. Pemerintah daerah membutuhkan data, staf, sarana pemadaman, layanan medis, dan dukungan fiskal. Rencana nasional perlu mengakui perbedaan kapasitas antardaerah dan tidak mengandalkan arahan umum tanpa bantuan implementasi.

Perusahaan dan pemegang konsesi perlu menerapkan pencegahan kebakaran, pengelolaan gambut, pemantauan titik api, perlindungan pekerja, dan pengungkapan informasi. Audit harus menilai hasil lingkungan, bukan hanya keberadaan dokumen. Kepatuhan sukarela dapat melengkapi tetapi tidak menggantikan inspeksi dan sanksi. Investor, pembeli komoditas, dan lembaga keuangan dapat mendorong rantai pasok bebas kebakaran melalui persyaratan yang jelas dan mekanisme pemulihan. Pemulihan harus menghindari pendekatan yang hanya memindahkan produksi dan risiko ke wilayah lain.

18. Komunikasi risiko yang dipercaya dan inklusif

Komunikasi kabut asap harus menyampaikan informasi secara konsisten, cepat, dan dapat digunakan. Pesan idealnya menjawab empat hal: kondisi udara saat ini dan prakiraannya, kelompok yang perlu lebih berhati-hati, kegiatan yang perlu disesuaikan, dan lokasi atau layanan yang dapat diakses. Peringatan perlu membedakan data hasil pengukuran dari perkiraan model. Jika terdapat ketidakpastian, jelaskan apa yang belum diketahui tanpa menyembunyikan adanya risiko. Pembaruan berkala mengurangi ruang bagi rumor dan informasi menyesatkan.

Bahasa harus mudah dipahami dan sesuai konteks. Istilah teknis seperti $PM_{2.5}$, aerosol optical depth, atau konsentrasi mikrogram per meter kubik perlu diterangkan dengan analogi atau disertai tindakan. Materi dapat memakai bahasa daerah, visual, audio, dan format aksesibel. Kanal komunikasi perlu beragam: SMS, radio, media sosial, posyandu, sekolah, tempat ibadah, pengeras suara desa, serta organisasi pekerja. Sistem tidak boleh hanya mengandalkan internet dan smartphone karena kelompok miskin, lansia, atau daerah terpencil mungkin tidak terhubung.

Kepercayaan publik ditentukan oleh pengalaman, kredibilitas, dan kemampuan pemerintah menyediakan perlindungan. Bila pesan menyuruh tinggal di dalam ruangan tetapi keluarga tidak memiliki ruang yang lebih bersih, masyarakat akan menilai pesan itu tidak relevan. Bila sekolah ditutup tetapi anak harus ikut orang tua bekerja, paparan mungkin tidak berkurang. Karena itu, komunikasi harus didampingi bantuan nyata, seperti ruang bersih, dukungan transportasi, layanan kesehatan, masker sesuai, dan perlindungan pendapatan. Pengelola krisis perlu mendengar umpan balik warga, mengoreksi informasi keliru secara terbuka, dan menjelaskan alasan keputusan.

Media massa dapat membantu membedakan kabut asap dari kabut meteorologis, menjelaskan keterkaitan iklim dan penggunaan lahan, dan melaporkan pilihan kebijakan. Peliputan sebaiknya menghindari penyederhanaan “El Niño menyebabkan asap” atau “semua masalah akibat

pembakaran petani". Jurnalis dapat meminta sumber data, memahami batas estimasi model, dan menyertakan suara warga serta ilmuwan. Komunikasi yang presisi mendukung akuntabilitas karena publik dapat mengetahui faktor yang dapat dikendalikan dan tindakan yang belum dilakukan.

19. Pembiayaan dan perlindungan sosial

Pembiayaan kesiapsiagaan perlu tersedia sebelum musim kering, bukan baru dibuka ketika kebakaran telah meluas. Dana preventif dapat digunakan untuk pemantauan, pembasahan gambut, patroli, pelatihan, alat keselamatan, edukasi, dan dukungan praktik tanpa bakar. Anggaran respons perlu memiliki mekanisme pencairan cepat untuk layanan kesehatan, ruang udara bersih, transportasi, perlindungan pekerja, dan bantuan keluarga. Penggunaan dana harus transparan dan dapat diaudit. Pembiayaan berbasis hasil dapat membantu, tetapi indikatornya perlu mengukur pengurangan risiko dan manfaat masyarakat, bukan hanya jumlah kegiatan.

Perlindungan sosial dapat mencegah keluarga harus memilih antara pendapatan dan keselamatan. Bantuan tunai sementara, jaminan pekerja, cuti sakit, kompensasi kerja, dan dukungan pangan dapat mengurangi tekanan untuk tetap bekerja di luar saat asap berat. Program perlu memastikan pekerja informal dan kelompok tanpa hubungan kerja formal tidak dikecualikan. Mekanisme registrasi bencana dapat memakai data sosial yang ada, namun harus menjaga privasi dan memberi proses banding untuk keluarga yang terlewat.

Biaya kesehatan kebakaran tidak seluruhnya masuk dalam klaim rumah sakit. Keluarga dapat membeli obat tanpa resep, mengurangi jam kerja, membatalkan perjalanan, merawat anggota keluarga, dan menanggung dampak kesehatan yang tidak segera muncul. Penilaian ekonomi harus memperhitungkan biaya tersebut dan mendisagregasikan siapa yang menanggungnya. Jika biaya kebakaran hanya dilihat sebagai kehilangan produksi perusahaan atau anggaran pemadaman, manfaat pencegahan

kesehatan akan terabaikan. Akuntansi kesehatan dapat menampilkan biaya penyakit yang dapat dihindari dan mendorong kolaborasi antara sektor lingkungan dan kesehatan.

Skema pembiayaan iklim dan lingkungan dapat mendukung restorasi gambut serta perlindungan kesehatan, selama mekanisme manfaatnya adil. Komunitas perlu menerima kompensasi dan akses penghidupan alternatif yang berkelanjutan. Pendanaan harus memiliki standar perlindungan sosial, partisipasi, dan pelaporan. Proyek yang hanya memenuhi indikator karbon tetapi membatasi hak atau akses masyarakat tidak dapat dianggap sebagai adaptasi yang berhasil. Integrasi manfaat kesehatan memperluas ukuran keberhasilan.

20. Penelitian, data, dan penggunaan kecerdasan buatan secara bertanggung jawab

Indonesia membutuhkan jaringan pemantauan kualitas udara yang lebih merata, terutama di wilayah gambut, desa, sekolah, dan permukiman yang dekat dengan sumber kebakaran. Jaringan harus menggabungkan alat rujukan dan sensor biaya rendah dengan protokol kalibrasi, pemeliharaan, dan data terbuka. Pengukuran personal dan dalam ruang diperlukan untuk memahami hubungan antara konsentrasi ambient dan dosis nyata. Data kualitas udara perlu dihubungkan secara aman dengan kunjungan kesehatan, penyakit kronis, kehamilan, dan pekerjaan agar riset dapat menilai perbedaan paparan.

Agenda epidemiologi dapat mencakup studi kohort ibu-anak, panel pasien asma dan penyakit jantung, deret waktu puskesmas, analisis pekerja, serta evaluasi intervensi ruang bersih. Penelitian harus melaporkan ketidakpastian dan mencegah generalisasi yang terlalu luas dari satu kota atau satu episode. Riset kualitatif dapat menjelaskan bagaimana keluarga memahami peringatan, mengapa pekerja tetap terpapar, dan mengapa layanan tidak diakses. Kemitraan dengan universitas Indonesia, pemerintah daerah, komunitas, dan institusi internasional dapat membangun data lokal dan kapasitas penelitian.

Kecerdasan buatan dapat menggabungkan data satelit, meteorologi, titik panas, konsentrasi PM, kepadatan penduduk, dan kunjungan kesehatan untuk memprediksi hotspot paparan atau kebutuhan layanan. Namun model hanya sebaik data dan asumsi yang mendasarinya. Wilayah tanpa sensor mungkin dinilai aman karena tidak ada data; wilayah terpencil atau kelompok informal dapat menjadi tidak terlihat. Model dapat menimbulkan ketidakadilan jika mengalokasikan bantuan ke kota besar karena data mereka lebih lengkap. Karena itu, sistem harus diuji menurut wilayah dan kelompok, menyertakan audit bias, dan mempertahankan mekanisme koreksi manusia.

Penggunaan data kesehatan harus mematuhi kerahasiaan pasien, keamanan siber, pembatasan tujuan, dan prinsip minimisasi data. Data lokasi sensitif dapat diproses secara agregat. Akses model perlu dijelaskan kepada otoritas dan masyarakat yang terdampak. AI membantu analisis tetapi tidak menggantikan ahli epidemiologi, tenaga kesehatan, petugas lingkungan, atau pengetahuan lokal. Nilai teknologi ditentukan oleh apakah prediksi mendorong perlindungan yang efektif dan merata, bukan hanya kecanggihan algoritma.

21. Kerangka aksi terpadu sebelum, selama, dan setelah El Niño

Sebelum musim kering, pemerintah dan pemangku kepentingan perlu memperbarui peta lahan mudah terbakar, kondisi muka air gambut, lokasi kelompok rentan, kapasitas pemadaman, akses fasilitas kesehatan, dan jangkauan pemantauan udara. Rencana kontingensi perlu menetapkan skenario El Niño, IOD, serta prakiraan hujan lokal, termasuk peran tiap instansi dan mekanisme pembiayaan. Pelatihan dan simulasi menguji komunikasi, pengiriman bantuan, pembukaan ruang bersih, perlindungan sekolah, dan rujukan medis. Tahap ini juga saat yang tepat untuk mendukung petani menerapkan praktik tanpa bakar dan menyelesaikan masalah hidrologi lahan.

Saat kondisi kering berkembang, patroli dan pemantauan harus meningkat pada area berisiko. Pemerintah daerah dapat menyebarkan informasi

pembukaan lahan yang aman, menyediakan dukungan teknis, dan mengatasi konflik sumber air. Sistem kesehatan memperbarui daftar pasien risiko tinggi dengan persetujuan, memastikan pasokan obat, dan memeriksa kesiapan fasilitas. Sekolah dan pemberi kerja menyesuaikan protokol. Langkah pencegahan perlu dimulai sebelum titik api terdeteksi, karena kebakaran gambut yang telah menyebar sulit dikendalikan.

Ketika asap muncul, respons kesehatan dan pemadaman harus berjalan paralel. Data kualitas udara dan prakiraan menyokong tindakan berbasis dampak; puskesmas membuka jalur komunikasi; rumah sakit mengaktifkan rencana kapasitas; pemerintah mengurangi aktivitas luar ruang atau mengubah jadwal jika diperlukan; dan ruang bersih tersedia bagi orang yang tidak memiliki pilihan aman di rumah. Informasi gejala darurat, transportasi, dan fasilitas layanan harus disampaikan lintas kanal. Petugas pemadam dan pekerja lapangan memperoleh perlindungan sesuai bahaya.

Sesudah episode, pemulihan mencakup penilaian kesehatan, pemulihan layanan dan pendidikan, dukungan psikososial, evaluasi kerusakan, pemantauan kualitas air serta udara, dan pemulihan lahan. Analisis pascakejadian harus mengidentifikasi celah koordinasi, distribusi bantuan, kualitas data, serta kelompok yang tidak terlindungi. Keluarga yang kehilangan mata pencaharian memerlukan dukungan jangka menengah. Pelajaran harus mengubah rencana dan anggaran untuk musim berikutnya. Siklus aksi tidak boleh berhenti ketika hujan tiba, karena gambut yang terdegradasi dan insentif pembakaran tetap menjadi sumber risiko.

22. Contoh penerapan menurut konteks wilayah

Di wilayah gambut Sumatra atau Kalimantan, prioritas mencakup pemantauan muka air dan titik api, pembasahan kembali, patroli terpadu, akses pemadaman yang aman, perlindungan pekerja, serta sistem kesehatan yang dapat beroperasi saat transportasi terganggu. Puskesmas dapat bekerja sama dengan desa, perusahaan, dan kelompok masyarakat untuk memperbarui peta sumber air, jalur evakuasi, keluarga yang memerlukan bantuan, dan persediaan obat. Sekolah perlu

mengembangkan kebijakan kualitas udara yang mempertimbangkan rumah siswa, bukan hanya keadaan ruang kelas. Kampanye tanpa bakar harus disertai alat dan dukungan ekonomi.

Di kota besar yang menerima asap kiriman, sistem dapat memadukan stasiun kualitas udara, prakiraan angin, dan komunikasi kesehatan. Pemerintah kota dapat membuka perpustakaan, balai warga, atau bangunan publik yang telah diperiksa sebagai ruang udara lebih bersih. Sekolah dan tempat kerja memerlukan protokol aktivitas luar ruang; rumah sakit memperkirakan peningkatan kebutuhan klinis; dan transportasi publik memberi informasi kepada penumpang. Tata ruang jangka panjang dapat mengurangi paparan melalui jalur hijau dan desain bangunan, tetapi pengurangan emisi dari sumber tetap menjadi tindakan inti.

Di desa pertanian, strategi perlu menghormati kalender tanam dan kebutuhan pengelolaan residu. Penyuluh, koperasi, dan pemerintah desa dapat menguji teknik pengolahan tanpa bakar, berbagi alat, membangun kelompok pemantau, dan menetapkan prosedur pembakaran yang dilarang atau terkendali menurut aturan setempat. Petani kecil memerlukan akses terhadap pembiayaan dan pasar agar tidak terdorong membuka lahan melalui api. Kader kesehatan dapat mengidentifikasi ibu hamil, anak kecil, lansia, dan penderita penyakit kronis yang memerlukan informasi langsung saat kualitas udara menurun.

Di kawasan perdesaan terpencil dan kepulauan, sistem peringatan harus memiliki kanal alternatif ketika internet tidak stabil. Radio, pesan suara, jaringan kader, dan layanan telepon dapat memperluas jangkauan. Rujukan kesehatan perlu mengatur transportasi sebelum kejadian, bukan setelah kondisi kritis. Fasilitas kecil dapat menyiapkan ruang perawatan yang lebih bersih, persediaan obat, serta mekanisme komunikasi ke rumah sakit rujukan. Adaptasi harus disusun bersama warga agar sesuai bahasa, jarak, pekerjaan, dan sumber daya setempat.

23. Hambatan pelaksanaan dan cara mengatasinya

Hambatan pertama adalah fragmentasi kewenangan dan perbedaan tujuan. Instansi lingkungan mungkin berfokus pada luas kebakaran, dinas kesehatan pada pelayanan pasien, dinas pendidikan pada keberlangsungan belajar, dan perusahaan pada kegiatan produksi. Tanpa indikator bersama, masing-masing dapat melakukan kegiatan yang tidak saling mendukung. Forum koordinasi perlu memiliki target yang dapat diamati, mekanisme berbagi data, dan otoritas keputusan. Pendanaan berbasis risiko membantu mengarahkan sumber daya ke pencegahan, sementara evaluasi bersama menilai hasil lintas sektor.

Hambatan kedua adalah lemahnya data dan kesenjangan kapasitas. Sensor rusak, data puskesmas tidak terintegrasi, dan sebagian wilayah tidak memiliki alat ukur. Solusi bukan menunggu jaringan ideal, tetapi membangun sistem bertahap dengan standar mutu dan transparansi. Sensor biaya rendah dapat digunakan jika dikalibrasi; data satelit dapat mengisi sebagian ruang kosong; dan pencatatan klinis sederhana dapat memperbaiki surveilans. Pelatihan analisis data dan pembiayaan pemeliharaan harus masuk dalam rencana sejak awal.

Hambatan ketiga adalah ekonomi politik lahan. Pembakaran dapat memberi manfaat jangka pendek bagi sebagian aktor, sementara biaya kesehatan menyebar luas. Insentif dan penegakan perlu mengubah perhitungan tersebut. Alternatif tanpa bakar harus tersedia sebelum larangan diberlakukan secara ketat. Perusahaan yang beroperasi di lahan berisiko harus memiliki pencegahan dan pemulihan terukur. Kebijakan yang adil perlu membedakan kapasitas dan tanggung jawab, tetapi tidak membiarkan aktor kuat memindahkan dampak kepada masyarakat.

Hambatan keempat adalah ketidakpercayaan publik dan pesan yang tidak konsisten. Masyarakat sulit mengikuti panduan jika data berubah tanpa penjelasan atau jika pemerintah tidak menyediakan perlindungan dasar. Komunikasi perlu memiliki sumber utama, jejak pembaruan, dan mekanisme koreksi. Pemerintah dapat mengundang akademisi, organisasi

profesi, dan komunitas untuk memeriksa pedoman. Kepercayaan dibangun melalui respons nyata, keterbukaan, dan pertanggungjawaban setelah kejadian.

24. Indikator keberhasilan dan evaluasi kebijakan

Evaluasi perlu mengukur input, kesiapan, hasil langsung, dan dampak. Indikator input meliputi anggaran pencegahan, alat pemantauan, jumlah petugas terlatih, serta dukungan petani. Indikator kesiapan dapat mencatat proporsi fasilitas dengan rencana kabut asap, waktu pembaruan informasi, cakupan ruang bersih, persediaan obat, dan akses bagi penyandang disabilitas. Hasil langsung meliputi perubahan aktivitas berisiko, jumlah keluarga yang menerima bantuan, waktu respons kebakaran, serta jangkauan komunikasi. Dampak kesehatan dapat mengukur gejala, kunjungan, rawat inap, kematian, absensi, dan paparan kumulatif.

Indikator perlu dipilah menurut kelompok dan lokasi. Jumlah masker yang dibagikan tidak membuktikan bahwa perlindungan sampai kepada pekerja yang paling terpapar atau bahwa masker sesuai. Jumlah titik api yang dipadamkan tidak cukup jika muka air gambut terus turun dan pembakaran berulang. Pengurangan kunjungan dapat menunjukkan membaiknya kesehatan, tetapi bisa juga berarti masyarakat tidak dapat mencapai fasilitas. Karena itu, indikator kuantitatif harus dilengkapi wawancara, audit fasilitas, survei rumah tangga, dan data lingkungan.

Evaluasi dampak kebijakan perlu menggunakan pembanding dan mempertimbangkan faktor meteorologis serta ekonomi. Perubahan jumlah penyakit setelah program tidak otomatis disebabkan program. Analisis dapat membandingkan wilayah yang menerima intervensi dengan wilayah sejenis, memanfaatkan variasi waktu, atau menguji mekanisme tertentu. Penelitian implementasi membantu menjelaskan apakah program berjalan sesuai rancangan, siapa yang mendapatkan manfaat, dan apa hambatannya. Hasil harus disebarluaskan dalam format teknis maupun publik agar menjadi dasar koreksi.

Keberhasilan jangka panjang terlihat ketika musim kering tidak lagi dengan mudah berubah menjadi krisis asap; risiko penyakit dan paparan menurun; layanan penting tetap berfungsi; pekerja memiliki perlindungan; dan komunitas tidak harus menanggung biaya pencegahan sendiri. Ukuran tersebut membutuhkan pemantauan lintas tahun, sebab satu musim basah dapat menutupi kerentanan struktural. Laporan tahunan harus membandingkan kinerja, menyebut kegagalan, dan menetapkan tindak lanjut dengan tanggung jawab serta tenggat yang jelas.

25. Agenda riset prioritas Indonesia

Prioritas riset pertama adalah memperbaiki estimasi paparan personal dan dalam ruang. Jaringan sensor perlu diperluas ke sekolah, rumah tangga, wilayah gambut, dan tempat kerja. Studi dapat menggabungkan pengukuran $PM_{2.5}$, komposisi kimia, data meteorologi, wawancara aktivitas, dan pemodelan paparan. Tujuannya menguji seberapa jauh stasiun ambient mewakili dosis yang dihirup warga serta bagaimana ventilasi dan perilaku mengubah paparan. Riset juga perlu membandingkan asap gambut dengan sumber partikulat lain.

Kedua, perlu kohort dan sistem surveilans yang menilai efek pada masa kehamilan, kelahiran, perkembangan anak, penyakit kronis, dan kesehatan mental. Data longitudinal Indonesia akan membantu menilai paparan berulang dan perbedaan sosial. Penelitian harus melibatkan rumah sakit, puskesmas, posyandu, dan lembaga statistik dengan protokol etika yang kuat. Akses data harus melindungi privasi dan menghasilkan manfaat nyata bagi komunitas peserta.

Ketiga, penelitian perlu menguji intervensi dan kebijakan, bukan hanya menghitung dampak setelah kebakaran. Evaluasi ruang udara bersih, filtrasi sekolah, distribusi respirator, perubahan jam kerja, peringatan dini, pembasahan gambut, dan insentif tanpa bakar dapat menggunakan desain kuasi-eksperimental atau metode campuran. Penelitian biaya-efektivitas perlu memasukkan dampak kesehatan, pendidikan, pekerjaan, dan

ekosistem. Hasil harus disampaikan kepada pemerintah daerah dan pengguna kebijakan dalam waktu yang relevan.

Keempat, kajian tata kelola harus menelaah hubungan konsesi, hak lahan, sumber api, penegakan, dan distribusi dampak. Riset sosial dapat memahami mengapa pembakaran tetap dianggap pilihan termurah, bagaimana konflik lahan berkembang, dan bagaimana perempuan, masyarakat adat, serta pekerja mengalami risiko. Analisis AI dan data geospasial berguna untuk menemukan pola, namun harus melibatkan validasi lapangan dan keterbukaan metodologi. Agenda riset yang baik tidak hanya menambah publikasi, tetapi memperbaiki keputusan dan pembagian manfaat.

26. Atribusi iklim dan komunikasi hubungan sebab-akibat

Ketika kabut asap terjadi pada tahun El Niño, hubungan waktu itu memberi alasan untuk menguji mekanisme iklim, tetapi tidak cukup untuk menyimpulkan bahwa El Niño sendirian menyebabkan kebakaran atau seluruh dampak kesehatan. Atribusi iklim menguji bagaimana perubahan kondisi iklim mengubah peluang atau intensitas suatu bahaya dibandingkan kondisi kontrafaktual tanpa pengaruh tertentu. Untuk kebakaran Indonesia, analisis perlu mempertimbangkan curah hujan, defisit kelembapan, suhu dan kekeringan, indeks ENSO serta IOD, perubahan tutupan lahan, sejarah drainase, pola pembukaan lahan, dan strategi pemadaman. Untuk dampak kesehatan, diperlukan langkah tambahan yang menghubungkan emisi kebakaran dengan konsentrasi, paparan, dan luaran klinis.

Literatur menunjukkan El Niño dan kekeringan berinteraksi dengan pembukaan lahan serta emisi lanskap untuk meningkatkan risiko kesehatan di Asia Tenggara (Marlier et al., 2013). Analisis 2015 juga menunjukkan sensitivitas aktivitas kebakaran Indonesia terhadap kekeringan terkait El Niño bersifat nonlinier (Field et al., 2016). Keduanya menjelaskan bahwa kekeringan dapat memperbesar dampak dari keputusan dan kondisi lanskap yang ada. Model yang memisahkan kontribusi iklim, pembukaan

lahan, dan pengelolaan gambut dapat membantu menguji skenario kebijakan. Namun hasilnya perlu disajikan sebagai rentang dengan asumsi eksplisit, bukan angka sebab-akibat tunggal yang tampak pasti.

Komunikasi risiko sebaiknya menggunakan kalimat yang akurat seperti "kondisi El Niño meningkatkan peluang musim kering di wilayah tertentu dan dapat memperbesar risiko kebakaran pada lahan yang rentan; besarnya asap tetap dipengaruhi sumber penyalaan dan pengelolaan lahan". Rumusan tersebut mempertahankan peran variabilitas iklim tanpa menghapus tanggung jawab manusia dan kelembagaan. Jika komunikasi hanya menyebut El Niño, warga dapat menganggap krisis tidak dapat dicegah. Jika hanya menyebut pembakaran tanpa konteks musim kering dan gambut, kebijakan mungkin kurang mempersiapkan wilayah yang lebih rentan ketika hujan tertunda.

Pembedaan antara atribusi dan prakiraan juga penting. Prakiraan musiman menjelaskan peluang kondisi lebih kering yang dapat digunakan untuk menyiapkan pencegahan. Peringatan kualitas udara menilai konsentrasi atau potensi asap dalam hari hingga minggu. Penilaian dampak kesehatan menggabungkan paparan dan bukti epidemiologi, sering kali setelah data tersedia. Sistem informasi publik harus menunjukkan jenis informasi yang diberikan, jangka waktunya, dan tindakan yang dapat dilakukan. Penjelasan sederhana ini mencegah kebingungan antara ENSO, kekeringan, titik panas, kabut, dan ISPA seolah-olah semuanya satu fenomena yang sama.

27. Sintesis: dari pemahaman risiko menuju ketahanan kesehatan

El Niño memberi sinyal bahwa peluang kondisi kering meningkat di sejumlah wilayah, tetapi krisis kabut asap lahir dari interaksi iklim dan tata kelola lanskap. Pengeringan gambut, pembukaan lahan, ketersediaan bahan bakar, penyulut api, angin, dan kapasitas pemadaman menentukan emisi serta sebaran asap. Paparan kemudian dipengaruhi kualitas rumah, kegiatan kerja, perilaku, dan akses terhadap ruang lebih bersih. Dampak kesehatan dibentuk oleh usia, kehamilan, penyakit kronis, status sosial, dan

kemampuan mendapat pelayanan. Kerangka berlapis ini menunjukkan mengapa satu instruksi atau satu intervensi tidak cukup.

Bukti dari 1997, 2015, dan 2019 menunjukkan dampak dapat berupa keluhan akut, perubahan pemanfaatan layanan, beban penyakit kronis, dan kemungkinan konsekuensi jangka panjang pada masa awal kehidupan. Estimasi model tentang kematian dan beban penyakit memperluas pemahaman, namun memerlukan penjelasan ketidakpastian. Data klinik yang tidak menunjukkan lonjakan pada suatu luaran tidak otomatis membuktikan ketiadaan dampak, karena akses, pelaporan, dan perpindahan dapat berubah. Sebaliknya, asosiasi statistik tidak boleh dinyatakan sebagai sebab pasti untuk setiap individu. Komunikasi ilmiah yang seimbang membedakan observasi, estimasi, hipotesis, dan rekomendasi.

Kelompok rentan bukan hanya mereka yang memiliki tubuh lebih sensitif. Mereka juga mencakup orang yang tidak memiliki kendali untuk menghindari paparan: pekerja harian, keluarga yang tinggal dekat api, masyarakat dengan rumah tidak rapat, lansia yang tinggal sendiri, serta penyandang disabilitas tanpa transportasi. Perlindungan harus mengurangi bahaya pada sumber, menjaga kualitas udara, membantu warga menghindari paparan, dan memastikan pelayanan kesehatan siap. Kebijakan yang bertumpu pada kemampuan individu membeli masker atau pendingin akan memperbesar kesenjangan.

Ketahanan kesehatan berarti kemampuan mencegah, menyerap, dan pulih dari episode asap, sekaligus mengurangi kemungkinan episode berulang. Hal ini menuntut pencegahan kebakaran, pengelolaan gambut, sistem peringatan, ruang bersih, perlindungan pekerja, layanan yang berkesinambungan, data yang dapat dipercaya, dan pembiayaan yang berkeadilan. Kesiapsiagaan menjadi ukuran kapasitas institusi sebelum krisis tiba. Jika musim kering telah diperkirakan, maka persiapan peta risiko, stok obat, perlindungan sekolah, dan patroli dapat dimulai lebih awal. Kesimpulan kebijakan paling penting adalah bahwa kabut asap dapat

dicegah dan dampak kesehatannya dapat dikurangi; variabilitas iklim bukan alasan untuk menerima paparan yang sebetulnya dapat dihindari.

28. Kesimpulan dan rekomendasi strategis

El Niño merupakan pengali risiko melalui perubahan peluang hujan dan kekeringan, bukan sumber api yang berdiri sendiri. Pada bentang lahan yang dikeringkan dan terfragmentasi, khususnya gambut, musim kering dapat memudahkan penyalaan, memperpanjang pembakaran, dan meningkatkan emisi. Asap mengandung partikulat halus dan campuran polutan yang dapat bergerak jauh. Bukti Indonesia menunjukkan hubungan dengan gejala pernapasan, penggunaan layanan kesehatan, mortalitas yang diestimasi, serta kemungkinan konsekuensi pada masa awal kehidupan. Besaran dan kepastian setiap luaran bervariasi menurut rancangan penelitian, kualitas pengukuran paparan, serta asumsi model.

Strategi utama harus dimulai dari pencegahan sumber. Prioritasnya adalah menjaga gambut tetap basah dan pulih, mencegah pembakaran terbuka, menyediakan alternatif pengelolaan residu dan pembukaan lahan, menegakkan aturan secara transparan, dan memastikan pemegang lahan bertanggung jawab. Ketika prakiraan El Niño dan kekeringan menunjukkan risiko meningkat, pemerintah harus mengaktifkan patroli, dukungan petani, pemantauan, dan koordinasi sebelum api menyebar. Pencegahan merupakan intervensi kesehatan yang mengurangi paparan seluruh kelompok sekaligus melindungi ekosistem dan mata pencaharian.

Di sisi kesehatan, setiap daerah berisiko perlu memiliki rencana kesiapsiagaan yang menghubungkan informasi kualitas udara dengan tindakan klinis dan sosial. Rencana tersebut mencakup perlindungan anak dan ibu hamil, pasien kronis, lansia, penyandang disabilitas, pekerja luar ruang, serta keluarga dengan keterbatasan ekonomi. Sekolah, puskesmas, rumah sakit, perusahaan, dan komunitas perlu menetapkan peran, alur informasi, pasokan, ruang udara lebih bersih, rujukan, serta kesinambungan layanan. Pesan publik harus menyebut apa yang diketahui, apa yang diperkirakan, dan apa yang sebaiknya dilakukan, tanpa memindahkan

tanggung jawab dari pengelola lahan dan pemerintah kepada rumah tangga.

Investasi jangka panjang diperlukan untuk jaringan pemantauan kualitas udara, data kesehatan yang aman, penelitian longitudinal, perlindungan sosial pekerja, dan evaluasi program. Kecerdasan buatan dapat membantu memetakan risiko dan kebutuhan layanan apabila data mewakili wilayah dan kelompok yang beragam, diuji biasnya, serta digunakan dengan pengawasan manusia. Keberhasilan tidak cukup dinilai dari banyaknya sensor, masker, atau rapat koordinasi; indikator perlu mengukur penurunan kebakaran, paparan, gangguan kesehatan, ketimpangan, dan kontinuitas layanan. Pelaporan terbuka serta pembelajaran setelah setiap musim menjadi cara untuk memperbaiki kebijakan.

Indonesia menghadapi tantangan geografis dan sosial yang besar, tetapi pengalaman kebakaran juga memberi waktu untuk belajar. Prakiraan musiman dapat dimanfaatkan untuk mempersiapkan tindakan, meskipun tidak dapat menghilangkan ketidakpastian. Pengetahuan klinis perlu diterjemahkan ke prosedur layanan, sementara pengetahuan komunitas perlu hadir dalam perencanaan lahan dan evakuasi. Perlindungan kesehatan yang efektif menghubungkan tindakan di hulu—tata kelola hutan dan gambut—dengan tindakan di hilir—kualitas udara, komunikasi, dan pelayanan. Dengan pendekatan tersebut, El Niño menjadi sinyal kesiapsiagaan, bukan alasan menerima krisis asap sebagai sesuatu yang tak terhindarkan. Prinsip ini mengarahkan investasi kepada pencegahan jangka panjang, perlindungan berbasis bukti, koordinasi lintas sektor, dan pelayanan publik yang dapat diakses tanpa memandang usia, pekerjaan, lokasi, maupun kemampuan ekonomi.

29. Protokol minimum daerah dan pembagian tanggung jawab

Setiap kabupaten atau kota yang berisiko kebakaran dan asap perlu memiliki protokol minimum yang sederhana, diperbarui setiap tahun, dan diuji sebelum musim kering. Dokumen itu tidak harus menjadi rencana besar yang terpisah dari sistem yang telah ada. Ia dapat menjadi lampiran

operasional rencana penanggulangan bencana, rencana kesehatan daerah, atau rencana pengendalian kebakaran. Isi minimum mencakup peta bahaya dan paparan, daftar fasilitas kritis, ambang pemicu tindakan, pejabat yang berwenang mengaktifkan respons, cara membagikan informasi, jalur rujukan medis, skema perlindungan pekerja, daftar ruang udara lebih bersih, kebutuhan kelompok rentan, sumber dana, dan prosedur evaluasi. Protokol harus menggunakan bahasa yang dimengerti petugas lapangan serta memiliki kontak dan alur eskalasi yang teruji.

Sebelum musim kering, badan meteorologi dan instansi lingkungan menyediakan ringkasan prakiraan hujan, status kekeringan, titik api historis, kondisi gambut, serta peluang angin pembawa asap. Pemerintah daerah menggabungkan data tersebut dengan permukiman, sekolah, puskesmas, rumah sakit, perkebunan, jalur transportasi, sumber air, dan kelompok yang memerlukan dukungan. Dinas kesehatan memeriksa kesiapan obat dan tenaga; dinas pendidikan menguji prosedur sekolah; dinas sosial menilai perlindungan bagi lansia dan disabilitas; dinas tenaga kerja berkomunikasi dengan perusahaan serta pekerja informal; sementara desa memperbarui rencana patroli, evakuasi, dan dukungan keluarga. Setiap pemilik tugas perlu menyebut seorang penanggung jawab dan pengganti agar keputusan tidak bergantung pada satu pejabat.

Ketika indikator kekeringan meningkat, pemerintah daerah mengadakan rapat aktivasi yang berujung pada tindakan terukur, bukan sekadar pertukaran laporan. Tindakan dapat mencakup penguatan patroli dan pemadaman awal, dukungan alat pengolahan lahan tanpa bakar, pembasahan gambut sesuai rencana hidrologi, pemeriksaan pasien berisiko, serta kesiapan ruang layanan. Informasi kepada warga menyebut wilayah yang diperkirakan terdampak, tindakan hari itu, fasilitas yang beroperasi, dan cara memperoleh bantuan. Jika titik api terdeteksi, sumber daya pemadaman diarahkan dengan memperhatikan keselamatan petugas dan penduduk. Apabila konsentrasi polutan meningkat, sistem kesehatan, sekolah, dan tempat kerja mengikuti pemicu tindakan yang telah disepakati, sambil menilai kondisi aktual setempat.

Ruang udara lebih bersih perlu dirancang sebagai layanan yang dapat digunakan, bukan sekadar daftar gedung. Pemerintah daerah dapat menilai bangunan milik publik, fasilitas pendidikan, rumah ibadah, perpustakaan, dan balai desa menurut lokasi, kualitas udara dalam ruang, kapasitas, jam buka, aksesibilitas, ketersediaan air dan toilet, serta keamanan. Pengelola memberi informasi kepada masyarakat dengan kanal yang beragam. Transportasi atau pendampingan diperlukan bagi warga yang tidak dapat datang sendiri. Kriteria ruang tersebut harus jujur: fasilitas mungkin mengurangi paparan, tetapi tidak menjamin udara sepenuhnya bebas polutan. Rumah sakit dan puskesmas tetap menjadi pusat perawatan klinis dan tidak seharusnya dibebani sebagai ruang perlindungan umum tanpa pengaturan pasien.

Sesudah periode asap berakhir, setiap instansi menyerahkan laporan singkat mengenai tindakan yang dijalankan, warga yang menerima bantuan, hambatan, penggunaan anggaran, kejadian kesehatan, serta kebutuhan yang belum terpenuhi. Forum evaluasi mengundang perwakilan masyarakat, tenaga kesehatan, pekerja, organisasi disabilitas, akademisi, dan pengelola lahan. Mereka memeriksa apakah prosedur mudah diikuti, apakah peringatan tiba tepat waktu, apakah ruang perlindungan dapat dicapai, dan apakah keluarga kehilangan pendapatan atau akses perawatan. Temuan disusun dalam daftar tindak lanjut dengan penanggung jawab dan tenggat. Siklus ini mengubah pengalaman dari setiap musim menjadi pembelajaran kelembagaan. Protokol yang terus diuji dan diperbarui membuat prakiraan El Niño dapat diterjemahkan menjadi perlindungan yang nyata sebelum asap kembali menyelimuti permukiman.

Protokol minimum juga perlu menyediakan mekanisme pengaduan dan umpan balik yang berfungsi selama keadaan darurat. Warga harus dapat melaporkan titik api, pembakaran, informasi yang tidak akurat, fasilitas yang tidak dapat diakses, atau kebutuhan kesehatan yang belum tertangani melalui kanal yang aman. Laporan perlu diteruskan kepada instansi yang berwenang dan hasil tindak lanjutnya diinformasikan kembali kepada

pelapor bila memungkinkan. Mekanisme tidak boleh membuka identitas pelapor tanpa izin atau menempatkan warga pada risiko pembalasan. Pemerintah dapat menggabungkan kanal pengaduan dengan nomor layanan daerah, posko desa, atau sistem yang sudah tersedia, sepanjang petugas benar-benar ditugaskan menanggapi laporan. Inklusivitas juga menuntut kanal luring, layanan suara, penerjemahan bahasa lokal, serta aksesibilitas bagi penyandang disabilitas. Pengaduan warga merupakan sumber data lapangan yang melengkapi satelit dan sensor, namun tetap perlu diverifikasi. Jika sistem menanggapi laporan secara konsisten, masyarakat lebih mungkin berpartisipasi dalam pencegahan dan menganggap peringatan sebagai bagian dari perlindungan bersama.

Keberlanjutan protokol bergantung pada dukungan pimpinan dan pemahaman petugas yang berganti. Karena itu, setiap organisasi sebaiknya memasukkan tanggung jawab kabut asap ke dalam orientasi staf, rencana kerja tahunan, dan latihan kesiapsiagaan. Dokumen ringkas, kontak yang diperbarui, serta latihan bersama lebih bernilai daripada prosedur panjang yang tidak pernah diuji.

Glossarium

Aerosol optical depth (AOD) — Ukuran seberapa banyak aerosol mengurangi transmisi cahaya melalui kolom atmosfer; bukan pengukuran langsung $PM_{2.5}$ di permukaan.

El Niño–Southern Oscillation (ENSO) — Variabilitas laut-atmosfer di Pasifik tropis yang meliputi fase El Niño, La Niña, dan netral.

Gambut — Akumulasi bahan organik yang terbentuk pada kondisi jenuh air; ketika dikeringkan, gambut menjadi rentan terbakar.

ISPU — Indeks Standar Pencemar Udara; penyajian ringkas kondisi kualitas udara berdasarkan polutan dan ketentuan yang berlaku.

Kabut asap — Campuran asap dan partikel hasil pembakaran yang tersuspensi di udara dan dapat menurunkan kualitas udara serta jarak pandang.

Kebakaran lahan dan hutan — Pembakaran vegetasi, serasah, tanah organik, atau gambut, baik yang disengaja maupun tidak, dengan penyebab dan kondisi yang beragam.

$PM_{2.5}$ — Partikulat dengan diameter aerodinamis hingga sekitar 2,5 mikrometer; dapat mencapai bagian paru yang lebih dalam.

PM_{10} — Partikulat dengan diameter aerodinamis hingga sekitar 10 mikrometer.

Paparan — Kontak seseorang dengan polutan di lingkungan, ditentukan konsentrasi, durasi, lokasi, aktivitas, serta perlindungan yang digunakan.

Pencegahan tanpa bakar — Praktik penyiapan lahan dan pengelolaan residu tanpa menggunakan pembakaran terbuka.

Pembasahan kembali (rewetting) — Pemulihan kondisi hidrologi lahan gambut untuk menjaga kelembapan dan menurunkan kerentanan kebakaran.

Titik panas (hotspot) — Anomali termal yang terdeteksi satelit dan dapat mengindikasikan kebakaran; perlu verifikasi karena tidak semua hotspot adalah api aktif.

Fungsi konsentrasi–respons — Hubungan epidemiologis yang digunakan untuk memperkirakan perubahan risiko kesehatan pada tingkat paparan polutan tertentu.

Kematian prematur yang diestimasi — Perkiraan kematian populasi berdasarkan model paparan dan fungsi risiko; bukan penetapan sebab kematian individual.

Daftar Pustaka

Aditama, T. Y. (2000). Impact of haze from forest fire to respiratory health: Indonesian experience. *Respirology, 5*(2), 169–174. https://doi.org/10.1046/j.1440-1843.2000.00246.x

Field, R. D., van der Werf, G. R., Fanin, T., Fetzer, E. J., Fuller, R., Jethva, H., Levy, R. C., Livesey, N. J., Luo, M., Torres, O., & Worden, H. M. (2016). Indonesian fire activity and smoke pollution in 2015 show persistent nonlinear sensitivity to El Niño-induced drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 113*(33), 9204–9209. https://doi.org/10.1073/pnas.1524888113

Frankenberg, E., McKee, D., & Thomas, D. (2005). Health consequences of forest fires in Indonesia. *Demography, 42*(1), 109–129. https://doi.org/10.1353/dem.2005.0004

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

Jayachandran, S. (2009). Air quality and early-life mortality: Evidence from Indonesia's wildfires. *Journal of Human Resources, 44*(4), 916–954. https://doi.org/10.3368/jhr.44.4.916

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

Koplitz, S. N., Mickley, L. J., Marlier, M. E., Buonocore, J. J., Kim, P. S., Liu, T., Sulprizio, M. P., DeFries, R. S., Jacob, D. J., Schwartz, J., Pongsakul, P., & 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

Sambodo, N. P., Pradhan, M., Sparrow, R., & van Doorslaer, E. (2024). When the smoke gets in your lungs: Short-term effects of Indonesia's 2015 forest fires on health care use. *Environmental Health, 23*(1), Article 44. https://doi.org/10.1186/s12940-024-01079-x

Kunii, O., Kanagawa, S., Yajima, I., Hisamatsu, Y., Yamamura, S., Amagai, T., & Ismail, I. T. S. (2002). The 1997 haze disaster in Indonesia: Its air quality and health effects. *Archives of Environmental Health, 57*(1), 16–22. https://doi.org/10.1080/00039890209602912

Marlier, M. E., DeFries, R. S., Kim, P. S., Gaveau, D. L. A., Koplitz, S. N., Jacob, D. J., Mickley, L. J., & Myers, S. S. (2013). El Niño and health risks from landscape fire emissions in southeast Asia. *Nature Climate Change, 3*, 131–136. https://doi.org/10.1038/nclimate1658

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

Siregar, S., Idiawati, N., Berekute, A. K., Maulana, M., Pan, W.-C., & Yu, K.-P. (2024). Association between long-term $PM_{2.5}$ exposure and mortality on Sumatra Island: Indonesian Family Life Survey (IFLS) 2000–2014. *Environmental Monitoring and Assessment, 196*(12), Article 1173. https://doi.org/10.1007/s10661-024-13323-5

Tan-Soo, J.-S., & Pattanayak, S. K. (2019). Seeking natural capital projects: Forest fires, haze, and early-life exposure in Indonesia. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 116*(12), 5239–5245. https://doi.org/10.1073/pnas.1802876116

World Health Organization. (n.d.). *Wildfires*. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/wildfires-and-health

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

Catatan penulis

Naskah ini merupakan sintesis naratif berbasis literatur dan sumber kelembagaan yang dicantumkan, bukan tinjauan sistematis atau pedoman klinis. Estimasi dampak kesehatan dari pemodelan dijelaskan sebagai perkiraan populasi dengan asumsi dan ketidakpastian. Keputusan klinis individual mengikuti penilaian tenaga kesehatan dan pedoman resmi yang berlaku.