

Bab I

Oksigen dan Polusi Udara

Sumaryati dan Lilik Slamet Supriatin

Atmosfer bukan habitat makhluk hidup di Bumi, walaupun ada makhluk hidup yang berada melayang di udara, sifatnya hanya sementara dan akan kembali ke permukaan Bumi sebagai tempat tinggalnya. Namun demikian, udara—tepatnya oksigen—menjadi kebutuhan vital semua makhluk hidup, baik yang berada di daratan maupun di perairan. Udara tersebut dibutuhkan untuk proses pernapasan.

Dalam proses pernapasan, makhluk hidup dapat dibedakan menjadi pernapasan aerob dan pernapasan anaerob. Secara sederhana, pernapasan aerob adalah pernapasan yang mengambil gas oksigen (O_2) dan pernapasan anaerob untuk mengambil gas karbon dioksida (CO_2). Baik pernapasan aerob maupun anaerob keduanya digunakan untuk mengurai makanan yang ada pada tubuh makhluk hidup untuk mendapatkan energi.

Sumaryati & L. S. Supriatin

Badan Riset dan Inovasi Nasional, e-mail: suma011@brin.go.id

© 2026 Editor & Penulis

Sumaryati & Supriatin, L. S. (2026). Oksigen dan Polusi Udara. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (1–15). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1805 E-ISBN: 978-634-7933-34-8

Sebagian besar makhluk hidup di Bumi bernapas secara aerob, termasuk manusia. Oksigen yang masuk melalui pernapasan akan diikat oleh hemoglobin dalam darah untuk diedarkan ke seluruh tubuh.

A. Oksigen Dalam Kehidupan Manusia

Oksigen yang berada dalam udara merupakan kebutuhan vital dalam kehidupan manusia yang diambil melalui sistem pernapasan. Secara teori medis, manusia mampu bertahan 8–21 hari tanpa makan dan minum, dan jika hanya tanpa makan dapat bertahan sampai 2 bulan (Kottusch et al., 2009). Sementara itu, untuk tidak mengambil oksigen di udara atau tidak bernapas, manusia hanya mampu bertahan dalam waktu 30–60 detik. Dengan latihan pernapasan, manusia bertahan tidak bernapas sampai 2 menit, dan untuk profesi tertentu seperti penyelam dengan latihan yang intensif dapat bertahan sampai 10 menit (Pleil et al., 2021).

Proses pernapasan yang optimum membutuhkan kondisi organ sistem pernapasan yang sehat dan udara dalam kondisi tertentu, baik secara fisika maupun kimia. Sesuai fisiologis tubuh manusia, sistem pernapasan idealnya menghirup udara dalam tekanan 1 atmosfer dengan kadar oksigen sekitar 21%, dengan kebutuhan udara per hari sekitar 8,6 m³/hari. Jika manusia biasa tinggal di dataran rendah, kemudian berpindah pada tempat yang tinggi dengan tekanan udara yang berkurang, frekuensi pernapasan akan meningkat untuk menyesuaikan kebutuhan oksigen yang makin menipis, namun lama-lama tubuh dapat beradaptasi dengan lingkungannya (Pleil et al., 2021).

Tidak banyak kajian yang membahas korelasi antara parameter fisik—kelembapan dan temperatur udara—dan kesehatan pernapasan. Kajian kelembapan dan temperatur udara umumnya dikaitkan dengan indeks kenyamanan. Dalam kaitannya dengan pernapasan, eksperimen terbatas menunjukkan bahwa pernapasan pada udara dengan temperatur tinggi, yaitu di atas 30°C cenderung memicu stres fisiologis (Wu et al., 2022).

Komposisi kimia atmosfer, khususnya kadar oksigen secara alami sesuai dengan kebutuhan pernapasan manusia, yaitu sekitar 20,9%. Menurut ketentuan Occupational Safety and Health Administration (OSHA, 2025), konsentrasi oksigen dalam udara yang aman untuk pernapasan dalam kisaran (19,5–23,5)%.

Bernapas pada kondisi udara dengan konsentrasi oksigen yang rendah, kurang dari 19,5% berisiko menyebabkan terjadinya hipoksia, dan sebaliknya jika konsentrasi oksigen lebih dari 22% berisiko terjadi hiperoksia. Baik hipoksia (kekurangan oksigen) maupun hiperoksia (kelebihan oksigen) berdampak buruk bagi kesehatan, bahkan dapat menyebabkan kematian.

Selain konsentrasi oksigen yang rendah, hipoksia dapat disebabkan oleh tekanan udara yang rendah. Hal ini biasa terjadi pada orang yang semula tinggal di dataran rendah dengan tekanan udara satu atmosfer, kemudian pindah ke dataran tinggi dengan tekanan udara di bawah satu atmosfer, sebelum tubuh mampu beradaptasi dengan kondisi tekanan udara yang rendah ini (Pleil et al., 2021).

Kadar udara yang mengandung unsur karbon monoksida (CO) tinggi juga dapat menyebabkan hipoksia. Gas oksigen dan CO yang bersama-sama terhirup melalui pernapasan akan terikat pada hemoglobin dalam darah, tetapi kecepatan reaksi hemoglobin mengikat CO adalah 200–300 kali lebih cepat daripada hemoglobin mengikat oksigen (Patel S et al., 2024). Akibatnya, dengan banyaknya gas CO yang terhirup, darah banyak mengikat CO daripada oksigen sehingga terjadi hipoksia. Selain faktor eksternal seperti tingginya kadar CO di udara, hipoksia juga dapat disebabkan oleh faktor internal, yaitu kondisi kesehatan seseorang, terutama pada gangguan sistem pernapasan seperti pasien asma, TBC, dan Covid-19 (Grieb et al., 2021).

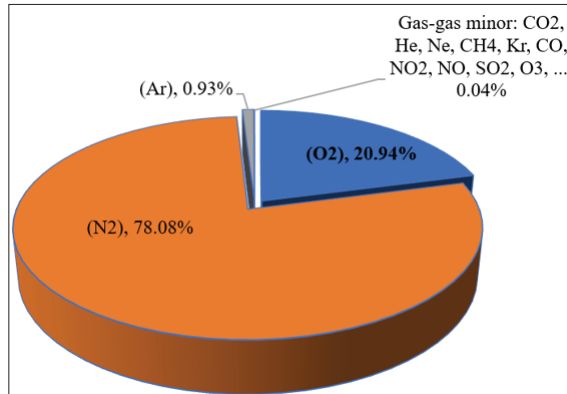
Gangguan hipoksia ini perlu mendapat perhatian yang serius karena berdampak akut (langsung), dan jika berlangsung lama, dapat berdampak kronis. Dampak akut dapat fatal, bahkan berujung pada kematian.

Banyak kasus kematian akibat pandemi Covid-19 disebabkan oleh penderitanya mengalami hipoksia. Hipoksia kronis dapat akan berdampak makin parah bagi pasien, antara lain menyebabkan kekurangan penyerapan nutrisi sehingga berdampak pada kekurangan berat badan—termasuk janin dalam kandungan—gangguan tidur, gangguan kognitif, dan gagal jantung (Bickler et al., 2017).

Meskipun pernapasan pada dasarnya adalah proses pengambilan oksigen dari udara, bernapas dalam udara dengan kandungan oksigen tinggi, apalagi oksigen murni, justru berbahaya. Konsentrasi oksigen yang tinggi, yang berdasarkan rekomendasi OSHA tidak boleh lebih dari 22%, berisiko menyebabkan hiperoksia, yaitu keracunan oksigen yang berdampak buruk bagi kesehatan. Hiperoksia membentuk *reactive oxygen species* (ROS) yang dapat membahayakan tubuh, seperti menyebabkan inflamasi, kerusakan DNA, dan vasokonstriksi (Singer et al., 2021).

Udara di atmosfer secara alami memiliki kadar oksigen yang sudah ideal untuk pernapasan sehingga tidak akan menyebabkan hiperoksia. Hiperoksia dapat terjadi pada pasien yang sedang menjalani terapi oksigen atau penambahan oksigen (Helmerhorst et al., 2015; Singer et al., 2021).

Komposisi udara terdiri atas tiga gas mayor, yaitu nitrogen (N_2) 78,08%, oksigen (O_2) 20,94%, dan argon (Ar) 0,93%. Sisanya 0,04%, terdiri atas banyak sekali jenis gas yang disebut *trace gases* (gas minor) (Pinti, 2021). Disebut *trace gases* karena konsentrasinya sangat kecil, dalam orde ppm (*parts per million* atau per sejuta), ppb (*parts per billion* atau per semiliar), bahkan ppt (*parts per trillion* atau per triliun). Sebagian dari gas-gas minor ini bersifat reaktif, seperti O_3 , CO, NO_x , SO_2 , dan VOC yang berperan sebagai polutan (Ojha et al., 2022).



Sumber: Pinti (2021)

Gambar 1.1 Komposisi Atmosfer

Secara alami, konsentrasi oksigen di udara ambien (20,94%) sudah tepat untuk kebutuhan pernapasan sehingga tidak menyebabkan hipoksia maupun hiperoksia. Meskipun terjadi penurunan kualitas udara, kadar oksigen di udara tidaklah berkurang secara signifikan. Mengapa? Kadar oksigen dalam udara bersih adalah 20,94% atau 209.400 ppm, dan kadar nitrogen 78,08% atau 780.800 ppm. Kadar polutan dalam udara jarang yang sampai kisaran puluhan ppm, sehingga perubahan kisaran puluhan ppm tidak secara signifikan menurunkan kadar nitrogen maupun oksigen.

Alat ukur oksigen yang ada di pasaran dengan limit deteksi 0,01% tidak akan mampu mendeteksi perubahan kadar oksigen karena adanya polusi udara. Akan tetapi, adanya gas CO yang tinggi sebagaimana diuraikan di atas dapat mengganggu penyerapan oksigen oleh hemoglobin.

Kadar oksigen dapat berubah secara signifikan jika ada kejadian kebocoran gas sintetis dari tabungnya, aktivitas vulkanologi seperti emisi gas CO₂ di Dieng, atau dari sumur-sumur mati yang tidak ada pertukaran udara. Kondisi ini memang dapat mematikan karena sifat racun dari gas-gas tersebut, atau karena konsentrasi gas-gas tersebut sangat tinggi sehingga konsentrasi oksigen berkurang secara signifikan.

Gas-gas dalam kelompok *trace gases* yang bersifat toksik, seperti CO, disebut polutan. Polutan di udara bukan hanya berupa gas-gas dalam kelompok *trace gases*, melainkan juga berupa partikel padat atau cairan dalam ukuran yang sangat kecil.

Oleh karena *trace gases* ini konsentrasinya sangat kecil (dalam kisaran ppm dan ppb), perubahan konsentrasi tidak berpengaruh secara signifikan pada konsentrasi oksigen. Hal itu karena konsentrasi oksigen sangat besar, yaitu $20,94\% = 209.400 \text{ ppm} = 209.400.000 \text{ ppb}$. Jika ada perubahan beberapa ppm atau beberapa ppb, tidak akan terdeteksi oleh alat ukur oksigen yang biasa memiliki limit deteksi 0,01%. Polutan selain gas CO, baik dalam bentuk padat, cair, maupun gas, tidak mengurangi kebutuhan oksigen tubuh serta tidak akan menurunkan kadar oksigen hingga kurang dari 19,5% yang menyebabkan kondisi hipoksia.

Adanya polutan udara dapat mengganggu kesehatan dan kenyamanan tubuh. Gangguan tersebut disebabkan oleh sifat toksik dari polutan udara, bukan karena berkurangnya oksigen. Selain berdampak buruk pada kesehatan, polutan udara juga berdampak pada lingkungan dan perubahan iklim.

B. Polutan Udara dan Klasifikasinya

PP No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (2021) menyatakan bahwa pencemaran udara atau polusi adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat energi, dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan oleh kegiatan manusia dan/atau proses alami sehingga berubahnya tatanan lingkungan dan kualitas lingkungan menjadi kurang atau tidak dapat berfungsi lagi sesuai peruntukannya. Definisi tersebut selaras dengan definisi polusi udara yang diberikan oleh World Health Organization (WHO, 2025), yaitu terkontaminasinya lingkungan udara, baik dalam ruangan maupun di luar ruangan oleh zat kimia, parameter fisika, unsur biologis atau apa pun yang mengubah karakter alami atmosfer.

Berdasarkan definisi dari PP No. 22 Tahun 2021 dan WHO tersebut, dapat diketahui, **pertama**, bahwa polusi udara dapat dikategorikan berdasarkan sumbernya, yaitu alami atau biogenik (masuknya zat, energi, komponen lain ke dalam udara ambien) dan sumber buatan atau antropogenik (dimasukkannya zat, energi, atau komponen lain ke dalam udara ambien). **Kedua**, cakupan polusi udara adalah polusi yang disebabkan oleh adanya zat tertentu—baik padat, cair, maupun gas—di dalam udara ambien maupun adanya energi berupa suara/bunyi berlebih (bising), panas, dan radiasi (polusi cahaya, radioaktif). **Ketiga**, kualitas udara ambien menurun jika terkena polusi udara sehingga terjadi penurunan fungsi lingkungan. Pembahasan dalam buku ini difokuskan pada polusi udara oleh zat kimia.

Menurut sumbernya, polusi udara dikategorikan menjadi sumber alami dan sumber buatan akibat aktivitas manusia atau antropogenik. Jika memasukkan kebakaran hutan sebagai sumber alami (Manisalidis et al., 2020), ada dua sumber alami besar di Indonesia, yaitu kebakaran hutan dan erupsi gunung api. Akan tetapi, sebagian besar kebakaran hutan yang terjadi di Indonesia disebabkan oleh pembersihan lahan sisa penebangan yang dilakukan dengan sengaja membakar, sehingga dapat menyebar ke areal hutan yang tidak menjadi target pembersihan lahan. Kebakaran hutan dikategorikan sumber alami jika kebakaran hutan terjadi secara alami, misalnya karena suhu lingkungan yang ekstrem panas dan angin kencang menyebabkan gesekan antarbiomassa menjadi sumber api alami yang memicu kebakaran, atau adanya petir yang menyambar puncak vegetasi hutan yang tinggi.

Sumber antropogenik polusi udara berasal dari transportasi (kendaraan bermotor), industri (pabrik), dan pembangkit listrik (Wiwardjo & Rahmayanti, 2021). Sektor domestik atau kegiatan rumah tangga juga termasuk sumber polusi buatan sekaligus sumber polusi *indoor*/dalam ruang (A'yun & Umaroh, 2023). Selain itu, penulis juga menemukan sumber polutan lain: sektor domestik menghasilkan sampah rumah tangga yang dapat menimbulkan polusi udara berupa bau tidak sedap, baik saat pengangkutan dalam

perjalanan maupun di lokasi Tempat Pembuangan Sementara (TPS) sampah dan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) sampah. Sumber antropogenik lain yang belum disebutkan berasal dari sektor pertanian dan kehutanan, serta perdagangan dan pariwisata.

Polusi udara dari sektor perdagangan dan perkantoran dapat berasal dari area parkir yang terletak di bawah tanah. Sementara itu, polusi udara dari sektor pariwisata berasal dari peningkatan jumlah wisatawan pada akhir pekan atau libur panjang, yang polusi udaranya tidak saja muncul di objek wisata, tetapi juga di jalan menuju objek wisata tersebut. Peningkatan wisatawan ini kerap menimbulkan kemacetan, yang berarti pemborosan energi bahan bakar kendaraan bermotor dan menghasilkan emisi polutan udara dalam jumlah relatif besar (Rossi et al., 2020).

Berdasarkan bentuk sumber emisi, polusi udara dapat dibedakan menjadi sumber titik, garis, dan area (Liu et al., 2018). Sumber titik dari kegiatan manusia berupa cerobong tunggal industri, sedangkan sumber titik alami, seperti berupa gunung api yang meletus. Sumber garis dicontohkan oleh jalan raya, tempat kendaraan bermotor melepaskan emisi secara memanjang mengikuti jalur lalu lintas. Adapun sumber area meliputi permukiman, kawasan industri, kebakaran hutan dan lahan, perdagangan dan pariwisata, serta pertanian. Di antara ketiga bentuk sumber tersebut, erupsi sektor transportasi dan industri menjadi sumber utama polusi udara penyebab kerusakan lingkungan (Brauers & Oei, 2020).

Berdasarkan waktu pelepasannya, sumber polutan udara dibedakan menjadi sumber kontinu, periodik, dan tidak kontinu. Industri, transportasi, domestik, dan perdagangan merupakan sumber polusi udara kontinu. Sumber polusi udara bersifat periodik adalah kebakaran hutan dan lahan, pariwisata, serta pertanian—misalnya saat pembakaran sisa hasil panen. Erupsi gunung api termasuk dalam sumber polusi udara tidak kontinu, yaitu ketika gunung api meletus.

Polutan udara dapat dilihat dari aspek fisik meliputi jenis zat, ukuran partikel zat, dan jenis energi, serta aspek kimia, meliputi

kandungan unsur kimia yang terdapat di dalamnya. Dari segi bentuk zat atau materi, polutan udara dibedakan menjadi gas, cairan, dan padatan (Anandari et al., 2024). Sementara itu, dari segi ukuran partikel, dikenal partikel dengan diameter lebih kecil dari 10 μm (PM_{10}) dan partikel berdiameter lebih kecil dari 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$). Ditinjau dari jenis energinya, polusi udara dapat berupa kebisingan dan polusi cahaya. Adapun dari segi kandungan zat kimia, polutan udara sebagian besar berbentuk gas, terdiri atas nitrogen oksida (NO_x), sulfur oksida (SO_x), karbon monoksida (CO), ozon (O_3) permukaan, *non-methane hydrocarbon* (NMHC), dan *volatile organic compound* (VOC) (Fath, 2021). Polutan udara juga menjadi komponen pembentuk hujan asam. Air lindi yang merupakan produk dari pembusukan sampah dapat menimbulkan polusi udara berupa bau.

Berdasarkan lokasi kejadian, sumber polusi udara dibedakan menjadi polusi *outdoor* (di luar ruangan) dan *indoor* (di dalam ruangan). Saat ini, masih sedikit sekali pustaka, kajian, dan penelitian yang membahas polusi udara *indoor*. Padahal, jika dilihat dari ilmu meteorologi terkait dispersi dan pengenceran polutan udara, polusi *indoor* lebih berbahaya daripada polusi udara *outdoor*. Hal ini karena angin sebagai pengencer dan sirkulator polutan udara di dalam ruangan bersifat terbatas, serta banyaknya bahan sintesis (kimia) yang terdapat dalam ruang yang dapat menjadi pemicu polutan udara.

Kasus polusi udara *indoor* massal yang banyak memakan korban terjadi pada tahun 1952 ketika musim dingin di London, Inggris. Kabut asap yang terbentuk dari pembakaran batu bara di tungku perapian setiap rumah mengandung belerang berkadar tinggi. Kabut asap ini terhirup oleh penghuni rumah bersamaan dengan aktivitas bernapas mereka sehari-hari. Penghuni rumah tidak menyadari kalau udara dalam rumah telah terpolusi sulfur dioksida berkonsentrasi tinggi dan bersifat fatal bagi kesehatan. Alhasil, banyak korban jiwa berjatuh pada musim dingin mencekam tahun 1952 tersebut (Polivka, 2018).

Berdasarkan reaktivitasnya, polutan udara ada yang bersifat reaktif dan *inert*. Polutan yang bersifat reaktif mudah terurai dan bereaksi dengan senyawa lain sehingga hanya berumur pendek di atmosfer dan hanya tersebar di sekitar sumber saja, sedangkan polutan yang bersifat *inert* menunjukkan hal yang sebaliknya. Jauh-dekatnya penyebaran polutan udara ini bukan hanya ditentukan oleh reaktif atau tidaknya polutan, melainkan juga ditentukan oleh kondisi cuaca dan topografi lokasi sumber serta daerah yang dilewati polutan.

Polutan yang reaktif bereaksi dengan senyawa lain atau terurai oleh radiasi matahari, kemudian berubah menjadi senyawa baru. Senyawa baru ini dapat bersifat tidak toksik, atau justru memiliki toksisitas yang lebih tinggi daripada senyawa asalnya. Polutan hasil reaksi kimia di atmosfer ini disebut polutan sekunder, misalnya ozon (O_3). Jadi, berdasarkan proses pembentukannya, polutan dapat dibedakan menjadi polutan primer dan sekunder, bahkan bisa pula terbentuk polutan tersier di atmosfer.

C. Fenomena Polusi Udara

Polusi udara sebenarnya bukan fenomena baru, bukan pula muncul setelah revolusi industri yang terjadi pada abad abad kedelapan belas. Perhatian terhadap hubungan antara kondisi udara dan kesehatan serta kematian tercatat sudah ada pada tahun 400 SM, dan pada awal tahun masehi sudah ada pembahasan bahaya asap (*smoke*) terhadap kesehatan (Fowler et al., 2020). Setelah revolusi, fenomena polusi udara makin meningkat dengan berbagai fenomena polusi udara yang disebabkan oleh berbagai jenis polutan antropogenik, baik dari jenis gas maupun dari partikel atau cairan, serta dampak yang ditimbulkan. Dengan demikian, fenomena polusi udara tidak dapat dipisahkan dari revolusi industri.

Menurut *Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI) VI Daring* yang diterbitkan oleh Badan Pengembangan dan Pembinaan Bahasa, Kementerian Pendidikan Dasar dan Menengah (Badan Bahasa,

2026), definisi fenomena polusi udara di sini adalah kejadian luar biasa terkait polusi udara yang dapat diindra dan dianalisis secara ilmiah. Fenomena polusi udara dapat dirasakan oleh indra penciuman dan penglihatan. Bau yang tercium oleh indra pencium dapat mengindikasikan adanya polusi udara yang tinggi. Fenomena polusi udara yang tinggi juga dapat diindra oleh mata yang secara umum masyarakat menyebut kabut polusi udara. Indra yang dapat mengetahui keberadaan polutan udara secara kualitatif dapat dibuktikan dan diperkuat dengan alat pengukuran polutan udara yang menunjukkan besaran secara kuantitatif.

Apa yang terlihat oleh mata sebagai kabut, jika ditelusuri dari sumber dan penyebabnya, akan muncul banyak klasifikasi dari kabut tersebut. Kabut yang disebabkan oleh uap air disebut *fog*, tetapi *fog* tidak termasuk polusi udara. Kebakaran hutan, terutama hutan pada lahan gambut menghasilkan kabut polusi udara yang dinamakan *smoke* atau *haze*. Aktivitas industri dan transportasi menimbulkan kabut polusi yang disebut *smog* yang berasal dari kata *smoke* dan *fog*. *Smog* yang berinteraksi dengan radiasi ultraviolet menghasilkan kabut yang dinamakan *photochemical smog*. Kabut yang berasal dari aktivitas gunung api namanya *vog*, yang merupakan singkatan dari *volcano smog*.

Selain beda sumber, setiap jenis kabut polusi tersebut muncul di lokasi yang berbeda dan memiliki komposisi kimia yang berbeda pula. Fenomena polusi udara dapat terjadi di daerah urban maupun rural, bahkan daerah *remote* yang tidak berpenghuni. Di daerah berpenghuni, kasus polusi udara bukan hanya terjadi di lingkungan terbuka (*outdoor*), melainkan juga terjadi di dalam ruangan tertutup (*indoor*).

Fenomena polusi udara sebagai akibat dari tingkat polusi yang tinggi berdampak buruk bagi kesehatan dan lingkungan. Dampak serius polusi udara pada kesehatan terutama dampak kronisnya sering tidak disadari, padahal telah menjadi penyebab kematian dan kematian dini yang besar di dunia, sehingga WHO (2020) pun menjuluki polusi udara sebagai *silent killer*.

Dampak lingkungan dari polusi udara menciptakan fenomena polusi udara yang lain. Perubahan pemandangan (*view*) langit karena tingkat polusi udara yang tinggi telah mengurangi jarak pandang. Proses pencucian polutan di atmosfer menyebabkan fenomena hujan asam, yang ditandai dengan nilai pH air hujan kurang dari 5,6. Air hujan yang bersifat asam ini membawa dampak negatif pada lingkungan, baik lingkungan air maupun daratan.

Fenomena polusi udara disebabkan oleh tingginya emisi polutan dan didukung oleh kondisi cuaca, terutama pada kondisi angin tenang dan kondisi stabilitas atmosfer sangat stabil atau ada kejadian inversi (Trinh et al., 2019; Xu et al., 2019). Ada sumber emisi polutan yang menghasilkan polutan dalam jumlah yang besar, seperti sumber dari kebakaran hutan, letusan gunung api, dan badai pasir. Emisi polutan yang besar berpotensi terdispersi jauh dari sumbernya. Penyebaran polutan yang melebihi jarak 100 km dari sumbernya dinamakan *long-range transport air pollutant*, dan jika penyebaran itu sampai lintas negara dinamakan *transboundary pollution*.

Kasus *transboundary pollution* sering menimbulkan hubungan yang kurang harmonis dengan negara tetangga. Pemodelan penyebaran polusi udara maupun pemantauan (*monitoring*) dengan menggunakan satelit menjadi instrumen untuk mengetahui *transboundary pollution*. Ada banyak pemodelan polusi udara dengan berbagai metode dan pendekatan yang menjelaskan bagaimana penyebaran polutan dari sumbernya. Hasil pemodelan polusi udara dapat ditampilkan dengan aplikasi komputasi, sehingga masyarakat dapat dengan mudah memahaminya.

Daftar Pustaka

Anandari, A. A., Wadji, A. F., & Harsono, G. (2024). Dampak Polusi Udara terhadap Kesehatan dan Kesiapan Pertahanan Negara di Provinsi DKI Jakarta. *Journal on Education*, 6(2), 10868–10884. <https://doi.org/10.31004/joe.v6i2.4880>

- A'yun, I. Q., & Umaroh, R. (2023). Polusi Udara dalam Ruang dan Kondisi Kesehatan: Analisis Rumah Tangga Indonesia. *Jurnal Ekonomi dan Pembangunan Indonesia*, 23(1), 16–26. <https://doi.org/10.21002/jepi.2022.02>
- Badan Pengembangan dan Pembinaan Bahasa, Kementerian Pendidikan Dasar dan Menengah. (2026). *Kamus Besar Bahasa Indonesia VI Daring*. <https://kbbi.kemendikdasmen.go.id>
- Bickler, P. E., Feiner, J. R., Lipnick, M. S., Batchelder, P., MacLeod, D. B., & Severinghaus, J. W. (2017). Effects of acute, profound hypoxia on healthy humans: Implications for safety of tests evaluating pulse oximetry or tissue oximetry performance. *Anesthesia & Analgesia*, 124(1), 146–153. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000001421>
- Brauers, H., & Oei, P.-Y. (2020). The political economy of coal in Poland: Drivers and barriers for a shift away from fossil fuels. *Energy Policy*, 144, 111621. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111621>
- Fath, M. A. (2021). Pengaruh kualitas udara dan kondisi iklim terhadap perekonomian masyarakat (literature review). *Media Gizi Kesmas*, 10(2), 329–342. <https://doi.org/10.20473/mgk.v10i2.2021.329-342>
- Fowler, D., Brimblecombe, P., Burrows, J., Heal, M. R., Grennfelt, P., Stevenson, D. S., Jowett, A., Nemitz, E., Coyle, M., Liu, X., Chang, Y., Fuller, G. W., Sutton, M. A., Klimont, Z., Unsworth, M. H., & Vieno, M. (2020). A chronology of global air quality. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2183), 20190314. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0314>
- Grieb, P., Świątkiewicz, M., Prus, K., & Rejdak, K. (2021). Hypoxia may be a determinative factor in Covid-19 progression. *Current Research in Pharmacology and Drug Discovery*, 2, 100030. <https://doi.org/10.1016/j.crphar.2021.100030>
- Helmerhorst, H. J. F., Schultz, M. J., Van Der Voort, P. H. J., De Jonge, E., & Van Westerloo, D. J. (2015). Bench-to-bedside review: The effects of hyperoxia during critical illness. *Critical Care*, 19(1), 284. <https://doi.org/10.1186/s13054-015-0996-4>
- Kottusch, P., Tillmann, M., & Püschel, K. (2009). [Survival time without food and drink]. *Archiv für Kriminologie*, 224(5–6), 184–191.
- Liu, D. H. F., Lipták, B. G., & Bouis, P. A. (Eds.). (2018). *Air pollution* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315137056>

- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health*, 8, 14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Occupational Safety and Health Administration. (2025). *Oxygen-deficient or oxygen-enriched atmospheres*. Dalam *Confined or enclosed spaces and other dangerous atmospheres*. U.S. Department of Labor. <https://www.osha.gov/etools/shipyard/ship-repair/confined-spaces/oxygen-deficient>
- Ojha, N., Girach, I., Soni, M., & Singh, N. (2022). Distribution of reactive trace gases over South Asia: Observations and modeling. In *Asian Atmospheric Pollution* (pp. 147–169). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816693-2.00022-6>
- Patel, S., Jose, A., & Mohiuddin, S. S. (2024). *Physiology, oxygen transport and carbon dioxide dissociation curve*. In StatPearls [Internet]. StatPearls Publishing. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK539815/>
- Pinti, D. L. (2021). Composition of the Earth's atmosphere. In *Encyclopedia of Geology* (pp. 187–197). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00054-0>
- Pleil, J. D., Ariel Geer Wallace, M., Davis, M. D., & Matty, C. M. (2021). The physics of human breathing: Flow, timing, volume, and pressure parameters for normal, on-demand, and ventilator respiration. *Journal of Breath Research*, 15(4), 042002. <https://doi.org/10.1088/1752-7163/ac2589>
- Polivka, B. J. (2018). The great London smog of 1952. *AJN, American Journal of Nursing*, 118(4), 57–61. <https://doi.org/10.1097/01.NAJ.0000532078.72372.c3>
- Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. <https://peraturan.bpk.go.id/Details/161852/pp-no-22-tahun-2021>
- Rossi, R., Ceccato, R., & Gastaldi, M. (2020). Effect of road traffic on air pollution. Experimental evidence from Covid-19 lockdown. *Sustainability*, 12(21), 8984. <https://doi.org/10.3390/su12218984>
- Singer, M., Young, P. J., Laffey, J. G., Asfar, P., Taccone, F. S., Skrifvars, M. B., Meyhoff, C. S., & Radermacher, P. (2021). Dangers of hyperoxia. *Critical Care*, 25(1), 440. <https://doi.org/10.1186/s13054-021-03815-y>

- Trinh, T. T., Trinh, T. T., Le, T. T., Nguyen, T. D. H., & Tu, B. M. (2019). Temperature inversion and air pollution relationship, and its effects on human health in Hanoi City, Vietnam. *Environmental Geochemistry and Health*, 41(2), 929–937. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0190-0>
- Wihardjo, S. D., & Rahmayanti, H. (2021). *Pendidikan lingkungan hidup* (1st ed.). PT Nasya Expanding Management.
- World Health Organization. (2020). *Air pollution: Silent killer* [Infografis]. <https://www.who.int/thailand/health-topics/air-pollution/images/default-source/thailand-images/Air-Pollution/infographics/1-silent-killer>
- World Health Organization. (2025). *Air pollution*. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
- Wu, Z., Li, N., Lan, L., & Wargocki, P. (2022). The effect of inhaled air temperature on thermal comfort, perceived air quality, acute health symptoms and physiological responses at two ambient temperatures. *Indoor Air*, 32(8). <https://doi.org/10.1111/ina.13092>
- Xu, T., Song, Y., Liu, M., Cai, X., Zhang, H., Guo, J., & Zhu, T. (2019). Temperature inversions in severe polluted days derived from radiosonde data in North China from 2011 to 2016. *Science of The Total Environment*, 647, 1011–1020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.088>