BRIN
BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

KARYA TERPILIH
PROGRAM AKUISISI
PENGETAHUAN LOKAL
TIDAK UNTUK DIPERJUALBELIKAN

Editor
Sumaryati
Lilik Slamet Supriatin

Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya

Fenomena
Polusi Udara dan Dampaknya

Diterbitkan pertama pada 2026 oleh Penerbit BRIN
Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id

Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Editor
Sumaryati
Lilik Slamet Supriatin

Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya

Penerbit BRIN

© 2026 Editor & Penulis

Katalog dalam Terbitan (KDT)
Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya/Sumaryati, Lilik Slamet Supriatin, Wiwiek Setyawati, Saipul Hamdi, Novita Ambarsari, Ninong Komala, Indra Chandra, Dyah Aries Tanti, Asri Indrawati, Nindia Noviastuti, Nur Faizah Romadona,Waluyo Eko Cahyono, Atep Radiana, Amalia Nurlatifah, Prawira Yudha Kombara, Emmanuel Adetya-Jakarta: Penerbit BRIN, 2026

xviii + 299 hlm.; 14,8 × 21 cm

ISBN 978-634-7933-34-8 (*e-book*)

1. Polusi udara
2. Pencemaran udara
3. Kualitas udara
4. Dampak polusi udara

363.7392

Editor Akuisisi : Rahma Hilma Taslima
Copy editor : Meilany
Proofreader : Meilany
Penata isi : Rahma Hilma Taslima, Heru Tri Handoko
Desainer sampul : Rahma Hilma Taslima, Heru Tri Handoko
Edisi pertama : November 2026

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie, Jl. M.H. Thamrin No. 8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
WhatsApp: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id
PenerbitBRIN
@Penerbit_BRIN
@penerbit.brin

Daftar Isi

Daftar Gambar x
Daftar Tabel xiii
Pengantar Penerbit xv
Kata Pengantar xvii
Prakata xix

Bab I Oksigen dan Polusi Udara 1
Sumaryati dan Lilik Slamet Supriatin
Bab II Smoke | Asap Mengungkap Bahaya Tersembunyi Asap Beracun dari Kebakaran Lahan Gambut Tropis 17
Wiwiek Setyawati dan Saipul Hamdi
Bab III Smog dan Smog Fotokimia 37
Novita Ambarsari dan Ninong Komala
Bab IV VOG | Volcano Smog Menelisik Ancaman Abu Vulkanis terhadap Kesehatan Manusia dan Lingkungan 55
Saipul Hamdi dan Wiwik Setyawati
Bab V Kualitas Udara dalam Ruang: Analisis, Evaluasi, dan Upaya Mitigasi 75
Indra Chandra
Bab VI Deposisi Asam 101
Dyah Aries Tanti, Asri Indrawati, dan Nindia Noviastuti

Bab VII Polusi Udara sebagai *Silent Killer*: Dampak, Tantangan, dan Solusi 121
Nur Faizah Romadona dan Waluyo Eko Cahyono
Bab VIII Transboundary Haze Pollution 149
Atep Radiana dan Amalia Nurlatifah
Bab IX Dampak Polusi Udara pada Lingkungan 179
Lilik Slamet Supriatin
Bab X Model Polusi Udara 213
Prawira Yudha Kombara dan Amalia Nurlatifah
Bab XI Peran dan Tantangan Sistem Informasi Kualitas Udara dalam Meningkatkan Kesehatan dan Kebijakan Lingkungan 227
Emmanuel Adetya
Bab XII Pengendalian Polusi Udara 247
Sumaryati

Glosarium 263
Biodata Editor 281
Biodata Penulis 283
Indeks 295

Daftar Gambar

Gambar 1.1	Komposisi Atmosfer	5
Gambar 3.1	*Fenomena Smog*	40
Gambar 3.2	Siklus Konveksi	43
Gambar 3.3	Skema Pembentukan Smog Fotokima	45
Gambar 3.4	Pemandangan Los Angeles Civic Center yang Tertutup Kabut Asap pada Tahun 1948	46
Gambar 3.5	Pemandangan Kampus Universitas Peking pada Hari-Hari yang Bersih dan Tercemar	51
Gambar 4.1	Sebaran Gunung Api di Indonesia (*Ring of Fire*)	58
Gambar 4.2	Erupsi Gunung Tambora pada tahun 1815 menghasilkan kaldera yang sangat besar	60
Gambar 4.3	Perubahan morfologi Kepulauan Krakatau akibat erupsi tahun 1883 dan kemunculan Gunung Anak Krakatau sejak tahun 1927.	62
Gambar 4.4	Perbandingan Kondisi Kota Saint-Pierre Sebelum dan Sesudah Erupsi Gunung Mont Peleé di Pulau Martinique, Karibia, pada Tahun 1902	63
Gambar 4.5	Skenario erupsi gunung berapi memengaruhi iklim, dalam jangka panjang menimbulkan efek pendinginan global atau *global cooling*.	68
Gambar 4.6	Deret waktu rata-rata anomali suhu udara dekat permukaan di wilayah benua maritim. Garis putus-putus vertikal adalah saat terjadinya erupsi Gunung Pinatubo.	69

Gambar 6.1 Mekanisme Deposisi Basah dan Deposisi Kering ... 104
Gambar 6.2 Emisi dari Prekusor Pengasaman Atmosfer di Asia pada Tahun 2010 Inventarisasi Emisi MIX Asia (unit: Gg/grid). Resolusi peta 0,25 x 0,25. 105
Gambar 6.3 *Automatic Rain Sampler* untuk Sampling Deposisi Basah 109
Gambar 6.4 Alat Sampling Deposisi Kering Analisis Laboratorium 109
Gambar 6.5 Tren Perkembangan Hujan Asam dan Variabel Terkait di Cina Dibandingkan dengan Eropa (EU-28) dan Amerika Serikat..... 116
Gambar 7.1 Mekanisme Kelarutan Polutan dan Penetrasi ke dalam Paru-paru 125
Gambar 7.2 Dampak Polusi Udara terhadap Penyakit Respirasi .. 129
Gambar 7.3 Dampak Polusi Udara terhadap Penyakit Jantung..... 130
Gambar 7.4 Estimasi Kematian Global Tahunan Berdasarkan Faktor Risiko Terpilih 136
Gambar 7.5 Solusi untuk Mengatasi Polusi Udara 141
Gambar 9.1 Cakrawala Langit dengan *Gray Air Cities* 187
Gambar 9.2 Kota dengan cakrawala *Brown Air Cities* 189
Gambar 10.1 Contoh Hasil Simulasi Trajektori Polutan dengan Menggunakan Model HYSPLIT di Wilayah Pontianak, Kalimantan Barat pada tanggal 28 Februari 2021 218
Gambar 10.2 Contoh Hasil Prediksi $PM_{2.5}$ dari Luaran Model WRF-Chem 221
Gambar 10.3 Tampilan Website Sumber Data Model CAMS 223
Gambar 10.4 Penyebaran Karbon Monoksida (CO) dari Data Model CAMS saat Kebakaran Hutan dan Lahan Tahun 2019 di Sumatra..... 224
Gambar 11.1 Global Distribution of Population-Weighted Annual $PM_{2.5}$ Concentrations for 2020 234
Gambar 11.2 Global Distribution of Population-Weighted Seasonal Ozone Concentrations for 2020 235
Gambar 11.3 Global Distribution of Population-Weighted Annual Nitrogen Dioxide Concentrations for 2020 236
Gambar 12.1 Kabut asap di Malaysia dan Singapura Dampak dari Kebakaran di Indonesia Sumatra dan Kalimantan.... 248

Gambar 12.2 Dampak Polusi Udara secara Langsung dan Tidak Langsung pada Manusia 250
Gambar 12.3 Penduduk Indonesia dan Dunia 255
Gambar 12.4 *Environmental Kuznets Curve* 257

Daftar Tabel

Tabel 3.1 Perbandingan antara Episode Polusi Historis di London, Los Angeles, dan Beijing 46
Tabel 3.2 Metode Pengukuran Polutan Komponen Smog 47
Tabel 3.3 Komponen Smog dan Dampaknya pada Kesehatan..... 50
Tabel 4.1 Dampak Paparan H_2S terhadap Kesehatan 66
Tabel 4.2 Perbandingan Erupsi Beberapa Gunung Berapi..... 70
Tabel 5.1 Baku Mutu dan Risiko Kesehatan Beberapa Polutan Udara dalam Ruang 80
Tabel 6.1 Parameter dan Teknik Analisis Deposisi Asam 110
Tabel 7.1 Jumlah Penduduk dan Kendaraan Bermotor Tahun 2021 hingga Tahun 2022 di Indonesia..... 137
Tabel 9.1 Persentase Visibilitas Akibat Pengaruh Jenis Polutan Udara..... 186
Tabel 9.2 Nilai VEI Beberapa Erupsi Gunung di Indonesia..... 190
Tabel 9.3 Kekuatan dan Lamanya Terpapar Suara yang Diperbolehkan..... 199
Tabel 9.5 Konsentrasi Minimal Ambien Zat Polutan Udara yang Menghasilkan Bau..... 200

Pengantar Penerbit

Sebagai penerbit ilmiah, Penerbit BRIN mempunyai tanggung jawab untuk terus berupaya menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Upaya tersebut merupakan salah satu perwujudan tugas Penerbit BRIN untuk turut serta membangun sumber daya manusia unggul dan mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Polusi udara adalah perubahan komposisi udara akibat masuknya zat, energi, atau unsur lain yang mengubah karakter alami atmosfer, baik yang berasal dari sumber alami seperti erupsi gunung api maupun aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil dan kebakaran lahan gambut. Fenomena ini hadir dalam berbagai wujud—mulai dari *smoke*, *smog*, kabut vulkanik (*vog*), hingga deposisi asam—yang tidak hanya menurunkan kualitas udara, tetapi juga mengancam kesehatan manusia sebagai *silent killer*, merusak ekosistem dan material, serta menimbulkan pencemaran lintas batas negara. Kompleksitas dampak ini menuntut pemahaman menyeluruh, mulai dari akar penyebab hingga upaya pe-

ngendaliannya.

Buku *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* hadir untuk mengupas tuntas berbagai fenomena polusi udara—oksigen dan mekanisme pernapasan, *smoke*, *smog* dan *smog* fotokimia, *vog*, kualitas udara dalam ruang, deposisi asam, dampak kesehatan, *transboundary haze pollution*, dampak lingkungan, hingga pemodelan, sistem informasi, dan strategi pengendalian kualitas udara. Buku ini disusun secara sistematis dari berbagai perspektif keilmuan untuk memberikan gambaran komprehensif tentang polusi udara di Indonesia dan dunia. Buku ini bermanfaat sebagai sumber referensi bagi peneliti, akademisi, pembuat kebijakan, maupun masyarakat umum yang ingin memahami fenomena polusi udara secara mendalam serta upaya mitigasi dan pengendaliannya.

Kami berharap hadirnya buku ini dapat menjadi referensi bacaan untuk menambah wawasan dan pengetahuan bagi seluruh pembaca. Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

Kata Pengantar

Polusi udara merupakan salah satu tantangan lingkungan yang tidak bisa kita hindari. Bahkan dalam rumah atau gedung yang seharusnya aman pun tidak luput dari ancaman polusi udara, *indoor air pollution*. Polusi udara tidak hanya memengaruhi kualitas hidup, tetapi juga menimbulkan dampak serius terhadap kesehatan, ekosistem, dan keberlanjutan pembangunan. Udara yang seharusnya menjadi sumber kehidupan kini sering tercemar oleh berbagai partikel dan gas berbahaya. Berbagai upaya dilakukan untuk menyelesaikan permasalahn polusi udara, tetapi masih menyisakan berbagai kasus polusi udara yang makin kompleks sehingga menjadikan polusi udara sebagai ancaman nyata yang kerap disebut *silent killer*.

Buku *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* ditulis oleh para pakar di bidangnya yang memberikan pemahaman komprehensif tentang polusi udara. Para penulis menjelaskan pengertian polusi udara, dan fenomena polusi udara yang kasat mata berupa asap yang dibedakan dalam bentuk *smoke*, *smog* dan *vog*. Selanjutnya dijelaskan polusi udara yang dapat terjadi

dalam ruangan, serta fenomena *transbounbdary pollution* yang sering menjadi masalah sensitif dalam hubungan dengan negara tetangga. Tak kalah menariknya dijelaksan juga berbagai dampak dari polusi udara, langkah pengendalian, model untuk menggambarkan dan mensimulasikan proses kejadian polusi udara, serta sistem informasi sebagai *tool* yang memudahkan masyarakat untuk mendapatkan informasi terkait polusi udara.

Diharapkan buku ini dapat memberikan pemahaman berbagai aspek terkait polusi udara kepada pembaca, dan yang tidak kalah pentingnya adalah membangkitkan kesadaran pembaca untuk menghindari dampak polusi udara dan ikut berperan dalam pengendalian polusi udara.

Jakarta, 09 Januari 2026

Dr. Albertus Sulaiman, S.Si., M.Si.
Kepala Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, BRIN

Prakata

Polusi udara memberikan ancaman nyata baik secara langsung maupun tidak langsung pada kualitas hidup manusia. Dampak langsung paparan polusi udara cukup serius pada kesehatan manusia, sehingga polusi udara sampai dikatakatan sebagai *silent killer*. Polusi udara juga berdampak pada degradasi lingkungan yang pada akhirnya berdampak pada kehidupan manusia. Dampak polusi udara yang serius dan kompleks ini sering belum disadari oleh masyarakat umum.

Buku ini menjelaskan pengertian polusi udara, fenomena polusi udara yang sering terjadi di Indonesia, dampak polusi udara, dan pengendalian serta pengelolaan polusi. Selain itu juga dijelaskan tentang model polusi udara yang saat ini biasa digunakan untuk memodelkan dan menganalisa kejadian polusi udara. Sistem informasi polusi sebagai jendela untuk mengetahui kondisi polusi udara yang telah lalu, saat ini dan prediksi yang akan juga dijelaskan dalam buku ini. Penulis

menyampaikan penjelasan materi dengan bahasa semi poluper untuk mudah dipahami masyarakat umum.

Editor berharap buku ini tidak hanya menjadi referensi akademik, tetapi juga menjadi panggilan moral bagi kita semua untuk lebih peduli terhadap udara yang kita hirup setiap hari. Semoga karya ini dapat memperluas wawasan, menumbuhkan kesadaran, dan mendorong aksi nyata dalam menjaga kualitas udara untuk saat ini dan untuk generasi yang akan datang.

Kami sampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih disampaikan kepada pihak-pihak yang telah berkontribusi dalam penulisan buku ini. Tidak lupa juga kami menyampaikan terima kasih kepada Penerbit BRIN yang telah memfasilitasi untuk penerbitan buku ini. Semoga buku memberikan ini bermanfaat bagi pembaca.

Bandung, 12 Januari 2026

Editor

Bab I
Oksigen dan Polusi Udara

Sumaryati dan Lilik Slamet Supriatin

Atmosfer bukan habitat makhluk hidup di Bumi, kalaupun 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 dapar 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 m^3/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).

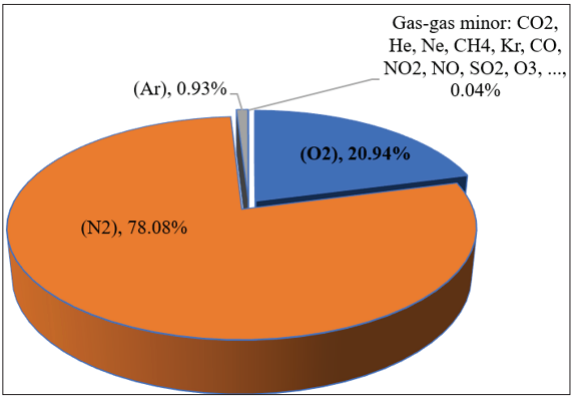
Gangguan hipoksia ini perlu mendapat perhatian yang serius karena berdampak akut (langsung), dan jika berlangsung lama, dapat berdampak kronis. Dampak akut dapat fatal, bahkan berujung pada kematian.

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 CO_2 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 ppm = 209.400.000 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 (Wihardjo & 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 ($PM_{2,5}$). 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 (SOx), 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 sintetis (kimiawi) 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 berjatuhan 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 K*amus 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 Ruangan 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-Poluution/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

Bab II

Smoke | Asap Mengungkap Bahaya Tersembunyi Asap Beracun dari Kebakaran Lahan Gambut Tropis

Wiwiek Setyawati dan Saipul Hamdi

Smoke atau asap merupakan salah satu polutan di udara yang secara visual keberadaannya terlihat oleh mata. Asap dapat dihasilkan dari proses pembakaran tidak sempurna. Pada skala kecil, asap dapat ditemukan sehari-hari dalam asap rokok dan kegiatan memasak yang menggunakan kayu bakar. Asap ini hanya terlihat tidak jauh dari sumbernya. Pembakaran sampah, baik sampah rumah tangga maupun sampah hasil pertanian, menghasilkan asap yang cukup besar.

W. Setyawati & S. Hamdi
Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: wiwi007@brin.go.id

© 2026 Editor & Penulis

Setyawati, W. & Hamdi, S. (2026). Smoke | Asap Mengungkap Bahaya Tersembunyi Asap Beracun dari Kebakaran Lahan Gambut Tropis. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (17–35). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1806
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

Sumber *smoke* yang menyita perhatian di Indonesia berasal dari kebakaran hutan dan lahan, terutama lahan gambut. Kebakaran lahan gambut menghasilkan asap hingga membentuk kabut asap atau *haze* yang mengganggu kesehatan dan mengurangi jarak pandang. Tebalnya kabut asap dari kebakaran lahan gambut ini menyebar hingga jarak jauh (*long-range transport air pollution*), bahkan menyebar melintasi batas negara (*transboundary haze pollution*). Oleh karena itu, pembahasan *smoke* di Indonesia tidak dapat dipisahkan dari lahan gambut, yang akan diuraikan dalam bab ini.

A. Mengenal Peran Penting Lahan Gambut Tropis

Lahan gambut tropis merupakan harta karun tersembunyi yang berperan penting bagi kesehatan planet kita, tetapi sering kali keberadaannya kurang dihargai. Ekosistem ini mencakup wilayah yang luas, seperti Indonesia, Malaysia, dan sebagian Amerika Selatan, ekosistem ini berfungsi sebagai reservoir keanekaragaman hayati, penyimpanan karbon, dan mata pencaharian yang sangat berharga bagi jutaan orang.

Lahan gambut memiliki signifikansi yang jauh melampaui batas negara, memengaruhi pola iklim global, dan menyediakan jasa ekosistem penting yang bermanfaat bagi kita semua. Hal ini menandakan betapa pentingnya peran lahan gambut tropis Indonesia dalam mengendalikan iklim dunia dan menjaga keberlangsungan kehidupan makhluk hidup di dunia.

Indonesia memiliki hutan dan lahan gambut tropis terluas di dunia dengan perkiraan total luasnya adalah sekitar 21 juta hektar yang tersebar di Sumatra, Kalimantan, dan Papua (Agus et al., 2008). Kementerian Pertanian (2011) melaporkan bahwa hutan dan lahan gambut terluas di Indonesia ditemukan di Sumatra (6.436.649 ha), Kalimantan (4.778.000 ha), dan Papua (3.690.000 ha).

Menurut Kementerian Lingkungan Hidup dalam PERMEN LH No.7/2006, tanah gambut adalah tanah hasil penumpukan bahan organik melalui produksi biomassa hutan hujan tropis. Sementara

itu, Kementerian Pertanian dalam PERMENTAN No.14/Permentan/PL.110/2009 mendefinisikan lahan ”gambut” sebagai tanah hasil akumulasi timbunan bahan organik dengan komposisi lebih besar dari 65% yang terbentuk secara alami dalam jangka waktu ratusan tahun dari lapukan vegetasi yang tumbuh di atasnya yang proses dekomposisinya terhambat suasana anaerob dan basah. Selanjutnya, Kementerian Kehutanan dalam PERMENHUT No. P69/Menhut-II/2011 mendefinisikan hutan ”gambut” sebagai satu formasi pohon-pohon yang tumbuh pada kawasan yang sebagian besar terbentuk oleh sisa-sisa bahan organik yang tertimbun dalam waktu lama. Oleh karena itu, ”gambut” adalah sisa-sisa bahan organik yang tertimbun dalam waktu yang lama.

Gambut tropis dicirikan oleh akumulasi bahan organik yang terurai sebagian dalam kondisi tergenang air. Selama ribuan tahun, lapisan vegetasi telah menumpuk membentuk endapan gambut tebal dengan panjang hingga ratusan kilometer. Lingkungan unik ini mendukung hidupnya beragam spesies tumbuhan dan hewan, yang banyak di antaranya tidak ditemukan di tempat lain di Bumi—mulai dari orangutan ikonik di Kalimantan hingga beragam burung berwarna-warni di kawasan gambut tropis Amerika Selatan—menjadikan lahan gambut tropis sebagai pusat keanekaragaman hayati yang penting secara global.

Gambut tropis memiliki perbedaan dengan gambut dari wilayah beriklim subtropis (*temperate climate*) dan boreal, yaitu sebagai berikut.

1) Umumnya, ditemukan di wilayah pesisir dengan drainase buruk dan curah hujan tinggi.
2) Akumulasinya dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti produktivitas primer yang tinggi, material kayu yang kasar, dan proses kimia yang memperlambat laju dekomposisi.
3) Memiliki tinggi muka air (*water table*) yang tinggi, tingkat pH rendah, dan akumulasi bahan organik yang tinggi.
4) Memiliki berat isi (*bulk density*) yang rendah dan porositas yang tinggi dalam kondisi tidak terganggu (*undisturbed*).

5) Memiliki tingkat sekuestrasi karbon (*carbon sequestration*) yang lebih tinggi dibandingkan lahan gambut boreal dan subtropis.

Salah satu fungsi lahan gambut tropis yang paling penting adalah perannya dalam penyimpanan dan penyerapan karbon. Gambut sangat efisien dalam memerangkap karbon dioksida (CO_2) dari atmosfer dan bertindak sebagai penyerap karbon alami yang membantu mitigasi perubahan iklim. Meskipun hanya menutupi sebagian kecil permukaan bumi, lahan gambut tropis menyimpan sekitar 30–40% karbon tanah dunia, menjadikannya komponen penting dalam siklus karbon global (KLHK, 2021; Adityasari, 2023). Dengan melestarikan ekosistem ini, kita dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan memerangi krisis iklim yang makin parah.

Gambut tropis juga menyediakan jasa ekosistem penting yang mendukung kesejahteraan dan kehidupan manusia, yaitu mengatur aliran air, bertindak sebagai penyangga alami terhadap banjir dan kekeringan, dan menyediakan habitat bagi ikan dan spesies air lainnya. Lahan gambut juga berperan penting dalam menjaga kualitas air, menyaring polutan dan sedimen sebelum mencapai ekosistem hilir. Selain itu, lahan gambut mendukung mata pencaharian tradisional seperti perikanan, pertanian, dan hasil hutan nonkayu, menyediakan makanan, bahan bakar, dan pendapatan bagi jutaan orang yang tinggal di wilayah tropis.

Namun, lahan gambut tropis menghadapi ancaman yang belum pernah terjadi sebelumnya akibat aktivitas manusia, termasuk deforestasi, drainase, dan konversi untuk pertanian dan pembangunan. Degradasi ekosistem yang meluas tidak hanya menyebabkan hilangnya keanekaragaman hayati dan jasa ekosistem, tetapi juga melepaskan sejumlah besar karbon yang tersimpan ke atmosfer, sehingga memperburuk perubahan iklim. Selain itu, pengeringan dan pembakaran gambut dapat mengakibatkan kebakaran hutan yang dahsyat, seperti yang terjadi dalam beberapa tahun terakhir di negara-negara seperti Indonesia, yang menyebabkan meluasnya polusi udara dan bahaya kesehatan

tidak hanya bagi masyarakat lokal, tetapi juga bagi negara tetangga akibat adanya pergerakan asap melewati lintas batas antarnegara (*transboundary pollutant*). Di sini, kami akan membahas penyebab kebakaran, kandungan asap, dampak yang ditimbulkan, dan upaya pencegahan serta mitigasi kebakaran lahan gambut di Indonesia.

B. Memahami Penyebab Kebakaran Gambut

Salah satu krisis lingkungan hidup yang berulang kali terjadi di Indonesia adalah kebakaran lahan gambut. Hampir setiap tahun, sebagian besar lahan gambut terbakar, hutan dilalap api, kota-kota terselimuti kabut tebal, serta ekosistem dan kesehatan manusia mengalami kerusakan akibatnya. Bagian ini akan membahas berbagai faktor yang memicu kebakaran lahan gambut di Indonesia serta alasan kebakaran tersebut tetap terjadi meskipun berbagai upaya pengendalian telah dilakukan.

Lahan gambut, yang ditandai dengan akumulasi bahan tanaman yang membusuk sebagian dalam kondisi tergenang air, mencakup wilayah yang luas di pulau-pulau di Indonesia, khususnya Sumatra dan Kalimantan. Ekosistem ini, yang menyimpan sejumlah besar karbon dan keanekaragaman hayati yang unik, berada di bawah tekanan yang makin besar akibat aktivitas manusia, seperti pertanian, penebangan kayu, dan konversi lahan. Ketika dikeringkan dan dibuka untuk budidaya, lahan gambut menjadi sangat mudah terbakar, sehingga menjadi sangat mudah terbakar dan menjadi bahan bakar yang sempurna bagi penyebaran api.

Salah satu penyebab utama kebakaran gambut di Indonesia adalah praktik pertanian tebang bakar (*slash and burn*), tempat petani dengan sengaja membakar hutan dan lahan gambut untuk membuka lahan untuk tanaman, seperti kelapa sawit, karet, dan kayu *pulp*. Meskipun ilegal, praktik tidak berkelanjutan ini terus meluas, didorong oleh faktor ekonomi dan kurangnya penegakan peraturan yang ada. Kombinasi kondisi cuaca kering, tumbuh-tumbuhan yang mudah terbakar, dan aktivitas manusia menciptakan

kondisi sempurna bagi terjadinya bencana kebakaran yang dapat meluas di luar kendali selama berbulan-bulan.

Faktor lain yang berkontribusi terhadap kebakaran lahan gambut di Indonesia adalah pengeringan lahan gambut untuk pengembangan industri, seperti perkebunan kelapa sawit dan proyek infrastruktur. Ketika lahan gambut dikeringkan untuk dijadikan lahan pertanian atau kawasan permukiman akibat urbanisasi, lahan gambut tersebut menjadi lebih rentan terhadap kebakaran, karena air yang tadinya membuat lahan gambut tetap lembap kini berkurang, sehingga meninggalkan tanah gambut yang sangat mudah terbakar. Selain itu, penggalian kanal dan parit untuk drainase menyebabkan masuknya oksigen ke dalam gambut, sehingga makin meningkatkan risiko kebakaran dan memperburuk penyebarannya.

Variabilitas iklim dan perubahan pola cuaca juga berperan dalam terjadinya dan meningkatnya keparahan kebakaran lahan gambut di Indonesia. Peristiwa El Niño, yang mengakibatkan kondisi wilayah menjadi lebih kering dan panas, dapat menciptakan kondisi ideal bagi api untuk berkobar dan menyebar. Dalam beberapa tahun terakhir, makin intensifnya peristiwa El Niño, ditambah dengan deforestasi dan degradasi lahan, telah menyebabkan terjadinya kebakaran lahan gambut yang belum pernah terjadi sebelumnya, sehingga mengakibatkan kerusakan lingkungan dan krisis kesehatan masyarakat (Budiharta, 2023; Greenpeace Southeast Asia, 2020; WMO, 2024).

C. Mengenal Karakteristik Kebakaran Lahan Gambut

Kebakaran lahan gambut yang membara (*smoldering)* mempunyai beberapa ciri yang berbeda dengan kebakaran yang menyala-nyala (*flaming*), antara lain sebagai berikut (Bourgeau-Chavez et al., 2020; Palamba et al., 2023; Rein, 2014; Rein & Huang, 2021; Watts et al., 2013; Xinyan et al., 2019).

1) Kebakaran *smoldering* terjadi pada temperatur yang lebih rendah, biasanya berkisar antara 500 °C hingga 700 °C, dibandingkan

flaming yang d apat mencapai suhu 1.500° C hingga 1.800° C. Temperatur yang lebih rendah dan laju penyebaran yang lebih lambat, sekitar 1 mm/menit, membuat kebakaran *smoldering* lebih sulit dipadamkan dan lebih persisten.

2) Kadar air berperan penting dalam penyalaan dan penyebaran kebakaran gambut. Ambang batas kelembapan kritis untuk terjadinya kebakaran adalah sekitar 120% untuk lahan gambut *boreal*, dan kandungan mineral yang lebih tinggi dapat menurunkan ambang batas ini. Artinya, lahan gambut yang lebih kering dari ambang batas ini rentan terhadap kebakaran, dan keberadaan mineral dapat meningkatkan penyebaran api.
3) Perubahan iklim juga merupakan faktor penting dalam terjadinya dan berlanjutnya kebakaran lahan gambut. Kondisi yang lebih hangat dan lebih kering dapat memperparah kebakaran serta menciptakan umpan balik positif yang berkontribusi terhadap penyebaran dan durasi kebakaran. Hal ini sangat memprihatinkan karena kebakaran lahan gambut dapat melepaskan gas rumah kaca dalam jumlah besar sehingga memperburuk perubahan iklim.

Kebakaran lahan gambut ditandai dengan temperatur yang rendah, laju penyebaran yang lambat, dan ketergantungan yang kuat pada kadar air. Kebakaran tersebut sulit dipadamkan, bertahan lama, dan melepaskan sejumlah besar gas rumah kaca ke atmosfer. Perubahan iklim memperparah kebakaran ini, sehingga menimbulkan kekhawatiran besar terhadap lingkungan dan kesehatan ekologis.

D. Mempelajari Kandungan Asap Kebakaran Lahan Gambut

Setelah tersulut, kebakaran di lahan gambut dapat bertahan selama berbulan-bulan, bahkan bertahun-tahun, dan melepaskan asap dalam jumlah besar ke atmosfer. Komposisi asap dari kebakaran lahan gambut di Indonesia menjadi perhatian besar karena dampaknya terhadap kualitas udara dan kesehatan manusia. Kebakaran lahan

gambut melepaskan campuran kompleks partikel dan gas yang dapat menimbulkan dampak yang parah. Berikut beberapa aspek penting komposisi asap dari kebakaran lahan gambut di Indonesia berdasarkan sumber yang tersedia.

1. Partikulat ($PM_{2.5}$)

$PM_{2.5}$ adalah partikel sangat kecil yang biasanya ditemukan dalam asap dan berdiameter 2,5 mikrometer (0,0025 mm) atau kurang. Kebakaran lahan gambut berkontribusi besar terhadap emisi $PM_{2.5}$, yang merupakan komponen utama asap yang dilepaskan selama kebakaran tersebut. Hasil pengukuran pada asap kebakaran gambut tahun 2015 menunjukkan bahwa terdapat sekitar 17,3 ± 6,0 g $PM_{2.5}$/ kg gambut yang terbakar (Jayarathne et al., 2018).

Menurut Hu et al. (2018) $PM_{2.5}$ yang terkandung dalam asap kebakaran gambut tropis nilainya relatif sedikit lebih rendah jika dibandingkan dengan gambut subtropik dan boreal. Namun demikian, mengingat kebakaran gambut di Indonesia yang lebih intensif dan ekstensif, beban emisi $PM_{2.5}$ ke atmosfer yang dihasilkan dapat menjadi lebih besar dibandingkan kebakaran gambut subtropik dan boreal. Menurut Kiely et al. (2019), kebakaran gambut bulan September–Oktober 2015 di Sumatra dan Kalimantan diperkirakan mengemisikan 7,33 Tg $PM_{2.5}$ ke atmosfer.

Karakterisasi $PM_{2.5}$ dari asap kebakaran gambut di Kalimantan Tengah menunjukkan adanya kandungan senyawa-senyawa yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan seperti polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH), logam berat (Fe, Cu, Zn, As, Cd, Ba, dan Pb), dan ion terlarut dalam air (Na^+, K^+, Cl^-, F^-, NH_4^+, SO_4^{2-}, NO_3-) (Jayarathne et al., 2018).

2. Gas-Gas Beracun

Asap dari kebakaran gambut mengandung gas-gas beracun. Beberapa yang terbesar meliputi HCN, NH_3, benzena, formaldehida, toluena, furan, NO_x, HNO_2, dan HCl. Hal yang menarik adalah tidak terdeteksinya SO_2 pada asap pembakaran gambut Indonesia (Christian et al., 2003; Stockwell et al., 2014; Yokelson et al., 2022),

yang membedakannya dengan *biomass burning*. Hal ini disebabkan oleh kandungan sulfur yang relatif sangat rendah dalam gambut tropis, yaitu sekitar 0,2–1,3% untuk gambut Sumatra (Priyono dan Wibisono, 2018), dan 0,12–2,22% untuk gambut Kalimantan (Setyawati, 2017).

3. Karbon

CO_2, CO, dan CH_4 merupakan tiga gas karbon terbesar yang diemisikan dari kebakaran gambut (Christian et al., 2003; Stockwell et al., 2014; Stockwell et al., 2019; Yokelson et al., 2022). Ketiganya dikenal sebagai gas rumah kaca yang berpotensi menyebabkan pemanasan global (*global warming*). Mayoritas emisi karbon akibat kebakaran lahan gambut berasal dari pembakaran lahan gambut, yang menyumbang sekitar 70% dari total emisi, sedangkan 30% sisanya berasal dari pembakaran biomassa di atas permukaan tanah (Rodríguez Vásquez et al., 2020). Estimasi awal mengenai emisi (gas rumah kaca) dari kebakaran lahan gambut ternyata meremehkan emisi yang sebenarnya, dengan margin kesalahan sebesar 200–300%. Artinya, emisi yang sebenarnya dapat 2 hingga 3 kali lipat lebih besar dari yang diperkirakan sebelumnya (Burgelman, 2022; Datta dan Krishnamoorti, 2022). Kesulitan pemantauan dan pengukuran kebakaran lahan gambut menyebabkan perkiraan dampak iklim yang terlalu rendah (Burgelman, 2022; INCAS, 2015; Rodríguez Vásquez et al., 2020).

E. Menyelidiki Dampak Asap Kebakaran Gambut

Campuran asap beracun yang dihasilkan oleh kebakaran lahan gambut menjadi ancaman. Meskipun kebakaran ini tampak seperti kejadian alam atau praktik budaya, dampaknya jauh melampaui lingkungan sekitar, sehingga menimbulkan risiko serius terhadap kesehatan manusia, ekosistem, ekonomi, dan iklim global. Beberapa dampak yang ditimbulkan dari asap kebakaran gambut kami rangkum di bawah ini.

1. Kualitas Udara dan Keberlangsungan Makhluk Hidup

Salah satu risiko paling langsung yang ditimbulkan oleh asap kebakaran lahan gambut adalah dampaknya terhadap kesehatan pernapasan. Menghirup partikel halus, yang dapat menembus jauh ke dalam paru-paru, dapat memperburuk kondisi pernapasan seperti asma dan penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), serta dapat meningkatkan risiko infeksi saluran pernapasan.

Kebakaran gambut tahun 2015 dilaporkan telah menimbulkan tingginya kadar karbon monoksida dalam asap gambut yang dapat mengganggu kemampuan tubuh untuk mengangkut oksigen, sehingga menyebabkan gejala, seperti pusing, mual, dan bahkan kematian dalam kasus yang ekstrem (Hu et al., 2018; Setyawati, 2017).

Senyawa beracun yang ditemukan dalam asap gambut dapat berdampak luas terhadap ekosistem dan satwa liar, misalnya *polycyclic aromatic hydrocarbon* (PAH) dan *volatile organic compound* (VOC). PAH diketahui bersifat karsinogenik dan dapat terakumulasi di tanah dan air sehingga menimbulkan risiko bagi tanaman, hewan, dan kehidupan akuatik (Kariyawasam et al., 2022; Mallah et al., 2022; Patel et al., 2020). VOC dapat bereaksi dengan polutan lain di atmosfer untuk membentuk ozon dan kabut asap, yang selanjutnya menurunkan kualitas udara dan membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan (Wang et al., 2022).

2. Ekonomi

Kebakaran lahan gambut tropis mempunyai dampak ekonomi yang signifikan, menyebabkan hilangnya lapangan kerja, dan menghambat pertumbuhan ekonomi masyarakat lokal. Kebakaran mengakibatkan kerugian ekonomi sebesar miliaran dolar karena hancurnya tanaman pertanian dan hutan serta melepaskan sejumlah besar CO_2 dan polutan udara yang menyebabkan dampak buruk terhadap kesehatan (Lee et al., 2022).

Kebakaran tahun 2015 di Indonesia saja mengakibatkan kerugian ekonomi sebesar US$28 miliar, dengan potensi upaya restorasi yang diperkirakan dapat mengurangi emisi CO_2 sebesar 18% dan mencegah 12.000 kematian dini (Krisnawati et al., 2022). Selain itu, kebakaran hutan yang berulang di lahan gambut terdegradasi di Kalimantan Tengah menimbulkan dampak ekonomi yang parah terhadap masyarakat lokal. Hal ini menunjukkan adanya saling ketergantungan antara mata pencaharian dan kebakaran hutan di wilayah tersebut (Samuel et al., 2023). Oleh karena itu, diperlukan intervensi kebijakan untuk memitigasi dampak ekonomi dan mendorong pembangunan ekonomi berkelanjutan di wilayah lahan gambut tropis yang rawan kebakaran.

3. Perubahan Iklim

Pembakaran lahan gambut berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca dan berdampak pada perubahan iklim. Kebakaran lahan gambut melepaskan sejumlah besar karbon, metana, dan gas rumah kaca lainnya yang tersimpan dalam jangka panjang, sehingga memperburuk siklus karbon dan menimbulkan efek umpan balik positif pada sistem iklim (Blackford et al., 2023; Wilkinson et al., 2023). Kebakaran hutan di lahan gambut mengurangi serapan karbon di kawasan alami dan meningkatkan emisi dari lahan gambut terdegradasi, sehingga menjadikan penyerap karbon saat ini rentan terhadap dampak perubahan iklim yang mempercepat hilangnya karbon (Kübert et al., 2023).

Kebakaran lahan gambut, terutama di wilayah tropis, melepaskan sejumlah besar aerosol dan gas yang memengaruhi iklim secara global. Selain itu, kebakaran lahan gambut yang membara sangat sulit dideteksi dari satelit. Model kebakaran perlu memasukkan kebakaran lahan gambut untuk memperkirakan secara akurat area yang terbakar, emisi karbon, serta memahami dampak saat ini dan masa depan terhadap iklim di wilayah lintang tinggi (Graham et al., 2022).

F. Upaya Pencegahan Dan Mitigasi

Upaya mengatasi akar penyebab kebakaran lahan gambut di Indonesia memerlukan pendekatan multifaset untuk mengatasi penyebab utama deforestasi, degradasi lahan, dan praktik penggunaan lahan yang tidak berkelanjutan. Hal ini mencakup penegakan hukum dan peraturan terhadap pembakaran ilegal dan pembukaan lahan, mendorong praktik pertanian berkelanjutan yang meminimalkan risiko kebakaran, dan memulihkan lahan gambut yang terdegradasi ke kondisi hidrologi alaminya. Kerja sama dan dukungan internasional juga penting dalam menyediakan sumber daya dan keahlian yang diperlukan untuk mencegah dan memitigasi dampak kebakaran lahan gambut di Indonesia.

Upaya mengatasi ancaman yang ditimbulkan oleh asap kebakaran lahan gambut memerlukan pendekatan multifaset yang mengatasi bahaya langsung dan penyebab mendasar dari kebakaran tersebut. Hal ini mencakup langkah-langkah untuk mencegah drainase dan degradasi lahan gambut, menegakkan peraturan ketat mengenai penggunaan lahan dan praktik pembakaran, serta berinvestasi dalam teknologi untuk deteksi dini dan pemadaman kebakaran. Hal ini juga memerlukan kesadaran dan pendidikan yang lebih besar mengenai risiko yang terkait dengan kebakaran lahan gambut, baik di kalangan pembuat kebijakan maupun masyarakat umum.

Kompleksitas dampak asap kebakaran lahan gambut menegaskan keterkaitan erat antara kesehatan manusia, ekosistem, dan sistem iklim global. Tindakan tegas untuk mengatasi akar penyebab kebakaran lahan gambut serta dampak yang ditimbulkannya diperlukan untuk melindungi kesehatan masyarakat dan kelestarian lingkungan bagi generasi mendatang.

Pemerintah dan masyarakat Indonesia telah melakukan beberapa inisiatif untuk mencegah dan memitigasi kebakaran gambut. Upaya tersebut antara lain sebagai berikut.

1) Badan Restorasi Gambut (BRG/BRGM): Didirikan pada tahun 2016, badan ini bertujuan untuk merestorasi lebih dari 2 juta hektar lahan gambut terdegradasi di beberapa provinsi melalui pembasahan kembali, revegetasi, pembangunan bendungan, dan tindakan lainnya. Meskipun organisasi ini menghadapi tantangan dalam mencapai targetnya, mandatnya telah diperluas.
2) Program Insentif Desa: Program ini memberikan insentif kepada desa-desa untuk menerapkan kebijakan tanpa membakar dan mencegah dan memadamkan kebakaran dengan cepat melalui paket bantuan. Hal ini bertujuan untuk membina kolaborasi antara masyarakat dan pemerintah/swasta.
3) Pemadam Kebakaran Masyarakat (Masyarakat Peduli Api/MPA): Ini adalah kelompok sukarelawan pemadam kebakaran yang dibentuk oleh kepala desa untuk membantu upaya pencegahan dan pemadaman kebakaran. Meskipun mereka sering kali kekurangan dana dan pelatihan, mereka memainkan peran penting dalam pengelolaan kebakaran berbasis masyarakat.
4) Program Desa Peduli Gambut: Program ini berfokus pada keterlibatan masyarakat, pendidikan, dan praktik berkelanjutan untuk mengurangi risiko kebakaran. Hal ini telah berhasil di beberapa daerah, seperti di Provinsi Riau, yang membantu mencegah kebakaran dan mendorong penggunaan lahan yang berkelanjutan.
5) Komunitas/Desa Peduli Kebakaran: Inisiatif ini bertujuan untuk mengintegrasikan strategi pencegahan kebakaran dengan sistem pertanian lokal serta mendorong praktik berkelanjutan dan keterlibatan masyarakat dalam pengelolaan kebakaran.
6) Sistem Kehutanan dan Pertanian Terpadu: Program ini menggabungkan pencegahan kebakaran dengan praktik kehutanan dan pertanian berkelanjutan, yang bertujuan untuk mengurangi risiko kebakaran dan mendorong kelestarian lingkungan.

Inisiatif-inisiatif ini menunjukkan komitmen pemerintah dan masyarakat Indonesia dalam mengatasi masalah kebakaran lahan gambut. Namun, masih ada tantangan yang dihadapi, seperti terbatasnya pendanaan dan pelatihan bagi pemadam kebakaran masyarakat, serta perlunya kolaborasi yang lebih efektif antarpemangku kepentingan.

Daftar Pustaka

Adityasari, M. (2023). *Siaran pers: Lahan gambut tropis punya peranan utama dalam mitigasi perubahan iklim*. YKAN. https://www.ykan.or.id/id/publikasi/artikel/siaran-pers/lahan-gambut-tropis-punya-peranan-utama-dalam-mitigasi-perubahan-iklim/

Agus, F., & Subiksa, I. G. M. (2008). *Lahan gambut: Potensi untuk pertanian dan aspek lingkungan*. Balai Penelitian Tanah dan World Agroforestry Centre (ICRAF).

Blackford, K., Voulgarakis, A., Prentice, C., Burton, C., & Kasoar, M. (2023, April 24–28). *Representing northern high latitude peat fires in the JULES-INFERNO fire model* [Conference presentation]. EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-6083

Bourgeau-Chavez, L. L., Grelik, S. L., Billmire, M., Jenkins, L. K., Kasischke, E. S., & Turetsky, M. R. (2020). Assessing boreal peat fire severity and vulnerability of peatlands to early season wildland fire. *Frontiers in Forests and Global Change*, *3*, Article 20. https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00020

Budiharta, S. (2023). *El Nino, karhutla, dan kesehatan masyarakat*. Kompas.id. https://www.kompas.id/baca/opini/2023/08/11/el-nino-karhutla-dan-kesehatan-masyarakat

Burgelman, S. (2022). *Greenhouse gas emission impact from peatland fires underestimated by 200%–300%, shows new study*. Frontiers. https://www.frontiersin.org/news/2022/02/08/greenhouse-gas-emission-impact-from-peatland-fires-underestimated-by-200-300-shows-new-study/

Christian, T. J., Kleiss, B., Yokelson, R. J., Holzinger, R., Crutzen, P. J., Hao, W. M., Saharjo, B. H., & Ward, D. E. (2003). Comprehensive laboratory measurements of biomass-burning emissions: 1. Emissions from Indonesian, African, and other fuels. *Journal of Geophysical Research*, *108*(D23), Article 4719. https://doi.org/10.1029/2003JD003704

Datta, A., & Krishnamoorti, R. (2022). Understanding the greenhouse gas impact of deforestation fires in Indonesia and Brazil in 2019 and 2020. *Frontiers in Climate*, *4*. https://doi.org/10.3389/fclim.2022.799632

Graham, L. L. B., Applegate, G. B., Thomas, A., Ryan, K. C., Saharjo, B. H., & Cochrane, M. A. (2022). A field study of tropical peat fire behaviour and associated carbon emissions. *Fire*, *5*(3), Article 62. https://doi.org/10.3390/fire5030062

Greenpeace Southeast Asia. (2020). *Membara: Dampak kesehatan dari kebakaran hutan di Indonesia dan implikasinya bagi pandemi Covid-19*. https://www.greenpeace.org/static/planet4-indonesia-stateless/2020/09/50e1f6a5-membara-2020-kebakaran-hutan.pdf

Hu, Y., Fernandez-Anez, N., Smith, T. E. L., & Rein, G. (2018). Review of emissions from smouldering peat fires and their contribution to regional haze episodes. *International Journal of Wildland Fire*, *27*, 293–312. https://doi.org/10.1071/WF17084

Indonesian National Carbon Accounting System. (2015). *INCAS standard method–Peat GHG emissions*. http://incas.menlhk.go.id/methodology/incas-standard-method-peat-ghg-emissions/

Jayarathne, T., Stockwell, C. E., Gilbert, A. A., Daugherty, K., Cochrane, M. A., Ryan, K. C., Putra, E. I., Saharjo, B. H., Nurhayati, A. D., Albar, I., Yokelson, R. J., & Stone, E. A. (2018). Chemical characterization of fine particulate matter emitted by peat fires in Central Kalimantan, Indonesia, during the 2015 El Niño. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *18*, 2585–2600. https://doi.org/10.5194/acp-18-2585-2018

Kariyawasam, T., Doran, G. S., Howitt, J. A., & Prenzler, P. D. (2022). Polycyclic aromatic hydrocarbon contamination in soils and sediments: Sustainable approaches for extraction and remediation. *Chemosphere*, *291*(Pt. 3), Article 132981. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132981

Kementerian Pertanian. (2011). *Peta lahan gambut Indonesia skala 1:250.000* (Edisi Desember 2011). Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian.

Kiely, L., Spracklen, D. V., Wiedinmyer, C., Conibear, L., Reddington, C. L., Archer-Nicholls, S., Lowe, D., Arnold, S. R., Knote, C., Khan, M. F., Latif, M. T., Kuwata, M., Budisulistiorini, S. H., & Syaufina, L. (2019). New estimate of particulate emissions from Indonesian peat fires in 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *19*, 11105–11121. https://doi.org/10.5194/acp-19-11105-2019

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

KLHK. (2021). *Indonesia: Kelola gambut dengan integrasi kebijakan bersama masyarakat*. https://ppid.menlhk.go.id/berita/siaran-pers/6042/indonesia-kelola-gambut-dengan-integrasi-kebijakan-bersama-masyarakat

Krisnawati, H., Volkova, L., Budiharto, B., Zamzani, F., Adinugroho, W. C., Qirom, M. A., & Weston, C. J. (2023). Building capacity for estimating fire emissions from tropical peatlands: A worked example from Indonesia. *Scientific Reports*, *13*, Article 14355. https://doi.org/10.1038/s41598-023-40894-z

Kübert, A., Aurela, M., Hatakka, J., Laurila, T., Rainne, J., Tuovinen, J.-P., Vekuri, H., & Lohila, A. (2023, April 24–28). *Peatland methane emissions in a changing climate: A 13-year time series of a boreal fen in Northern Finland* [Conference presentation]. EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-8556

Lee, J. S. H., Fatimah, Y. A., Smith, S. W., Rahman, N. E., Nurhidayah, L., Wardhana, B., Saad, A., Prasojo, Z., Khan, F., Wu, M. S., Giam, X., Chong, K. Y., Graham, L., & Lallemant, D. (2022, May 23–27). *Mapping socio-ecological vulnerability of tropical peat landscape fires* [Conference presentation]. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-6811

Mallah, M. A., Changxing, L., Mallah, M. A., Noreen, S., Liu, Y., Saeed, M., Xi, H., Ahmed, B., Feng, F., Mirjat, A. A., Wang, W., Jabar, A., Naveed, M., Li, J. H., & Zhang, Q. (2022). Polycyclic aromatic hydrocarbon and its effects on human health: An overview. *Chemosphere*, *296*, Article 133948. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133948

Palamba, P., Werdhani, A. S., & Numberi, J. J. (2022). Smoldering behavior of peat fire. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1192*, Article 012039. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1192/1/012039

Patel, A. B., Shaikh, S., Jain, K. R., Desai, C., & Madamwar, D. (2020). Polycyclic aromatic hydrocarbons: Sources, toxicity, and remediation approaches. *Frontiers in Microbiology*, *11*, Article 562813. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.562813

Priyono, & Wibisono, S. A. (2018). Karakteristik gambut berdasarkan analisis geokimia dan petrografi organik di Kabupaten Indragiri Hilir, Provinsi Riau. *Buletin Sumber Daya Geologi*, *13*(2), 128–140. https://doi.org/10.47599/bsdg.v13i2.72

Rein, G. (2014). *From Indonesia to Botswana, from Scotland to North Carolina, peat mega-fires burn for months, destroy habitat, clog the air with haze, and self-accelerate climate change impacts*. International Association of Wildland Fire. https://www.iawfonline.org/article/the-long-slow-burn-of-smouldering-peat-mega-fires/

Rein, G., & Huang, X. (2021). Smouldering wildfires in peatlands, forests and the arctic: Challenges and perspectives. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, *24*, Article 100296. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100296

Rodríguez Vásquez, M. J., Benoist, A., Roda, J. M., & Fortin, M. (2020). Estimating greenhouse gas emissions from peat combustion in wildfires on Indonesian peatlands, and their uncertainty. *Global Biogeochemical Cycles*, *35*(2). https://doi.org/10.1029/2019GB006218

Samuel, R., Yanetri, A. N., Trisna, A., Russell, R., Ammar, A. A., Stephen, J., & Dargusch, P. D. (2023). The dynamics of burning activity on degraded peatland in two villages in Central Kalimantan, Indonesia. *International Journal of Wildland Fire*, *32*, 222–237. https://doi.org/10.1071/WF22067

Setyawati, W. (2017). *Pengembangan faktor emisi dari kebakaran lahan gambut di Indonesia untuk menunjang inventori emisi gas rumah kaca (Studi kasus: Kalimantan)* [Disertasi doktoral, Institut Teknologi Bandung].

Stockwell, C. E., Yokelson, R. J., Kreidenweis, S. M., Robinson, A. L., DeMott, P. J., Sullivan, R. C., Reardon, J., Ryan, K. C., Griffith, D. W. T., & Stevens, L. (2014). Trace gas emissions from combustion of peat, crop residue, domestic biofuels, grasses, and other fuels: Configuration and Fourier transform infrared (FTIR) component of the fourth Fire Lab at Missoula Experiment (FLAME-4). *Atmospheric Chemistry and Physics*, *14*, 9727–9754. https://doi.org/10.5194/acp-14-9727-2014

Stockwell, C. E., Veres, P. R., Williams, J., & Yokelson, R. J. (2015). Characterization of biomass burning emissions from cooking fires, peat, crop residue, and other fuels with high-resolution proton-transfer-reaction time-of-flight mass spectrometry. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *15*, 845–865. https://doi.org/10.5194/acp-15-845-2015

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

Wang, Z., Shi, Z., Wang, F., Liang, W., Shi, G., Wang, W., Chen, D., Liang, D., Feng, Y., & Russell, A. (2022). Implications for ozone control by understanding the survivor bias in observed ozone-volatile organic compounds system. *npj Climate and Atmospheric Science*, *5*, Article 39. https://doi.org/10.1038/s41612-022-00261-7

Watts, A. C., & Kobziar, L. N. (2013). Smoldering combustion and ground fires: Ecological effects and multi-scale significance. *Fire Ecology*, *9*, 124–132. https://doi.org/10.4996/fireecology.0901124

Wilkinson, S. L., Andersen, R., & Moore, P. A. (2023). Wildfire and degradation accelerate northern peatland carbon release. *Nature Climate Change*, *13*, 456–461. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01657-w

WMO. (2024). *El Niño weakens but impacts continue*. World Meteorological Organization. https://wmo.int/news/media-centre/el-nino-weakens-impacts-continue

Xinyan, H., & Rein, G. (2019). Upward-and-downward spread of smoldering peat fire. *Proceedings of the Combustion Institute*, *37*(3), 4025–4033. https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.05.125

Yokelson, R. J., Saharjo, B. H., Stockwell, C. E., Putra, E. I., Jayarathne, T., Akbar, A., Albar, I., Blake, D. R., Graham, L. L. B., Kurniawan, A., Meinardi, S., Ningrum, D., Nurhayati, A. D., Saad, A., Sakuntaladewi, N., Setianto, E., Simpson, I. J., Stone, E. A., Sutikno, S., … Cochrane, M. A. (2022). Tropical peat fire emissions: 2019 field measurements in Sumatra and Borneo and synthesis with previous studies. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *22*, 10173–10194. https://doi.org/10.5194/acp-22-10173-2022

Bab III
Smog dan *Smog* Fotokimia

Novita Ambarsari dan Ninong Komala

Smog adalah salah satu fenomena polusi udara yang umumnya terjadi di wilayah perkotaan yang terdiri atas campuran asap dan kabut di udara atau disebut juga sebagai kabut asap. *Fog* atau kabut merupakan aerosol tampak yang tersusun oleh droplet air atau kristal es yang tersuspensi di dalam udara yang terlihat seperti awan tipis dan rendah. Distribusi dan karakteristik dari *smog* dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu angin, temperatur, dan sinar matahari (Gaffney et al., 2009).

Smog terbentuk dari reaksi kimia saat polutan kunci di udara seperti *volatile organic compound* (VOC) dan nitrogen oksida (NO_x) pada konsentrasi tinggi berinteraksi dengan oksidan, seperti hidroksil, ozon, dan nitrat. Sumber-sumber partikel dan polutan yang diperlukan untuk pembentukan *smog,* antara lain pembakaran

N. Ambarsari & N. Komala
Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: novita.ambarsari@brin.go.id

© 2026 Editor & Penulis

Ambarsari, N. & Komala, N. (2026). Smog dan Smog Fotokimia. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (37–54). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1807
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

batu bara, emisi dari lalu lintas, pembakaran lahan, dan erupsi gunung berapi. Aktivitas tersebut dapat secara langsung maupun tidak langsung berkontribusi terhadap produksi dari $PM_{2.5}$ sebagai *precursor* utama dari *smog*. Pembentukan *smog* dilaporkan sering terjadi di kota-kota besar di seluruh dunia, seperti Beijing, Delhi, Lahore, Mexico, Los Angeles, dan Tehran (Gaffney et al., 2009; Rani et al., 2011).

A. Tipe *Smog* Dan Reaksi Kimia Yang Terkait

1. *Smog* Klasik/*Smog* London

Polusi oleh *smog* pertama kali menjadi perhatian dunia digunakan sejak kejadian polusi udara pada awal tahun 1952 di London yang kemudian disebut sebagai "*smog* London", yaitu suatu kondisi polusi yang cukup parah yang tersuspensi di udara yang lembap. *Smog* London ini disebut juga sebagai *smog* sulfur yang diidentifikasi dari tingginya konsentrasi sulfur diokisda (SO_2) dan partikulat. *Smog* klasik atau *smog* London ini tersusun atas polutan udara yang sifatnya polutan primer yang dihasilkan langsung dari sumber emisinya, khususnya dari proses pembakaran yang dihasilkan oleh aktivitas manusia dan dipengaruhi juga oleh kondisi iklim, dominan terbentuk saat udara dingin pada pagi hari dengan kondisi angin pelan, serta lapisan batas atmosfer yang rendah sehingga polutan terkonsentrasi dalam suatu volume udara yang kecil (Bhartendu., 2013).

Reaksi kimia utama yang terjadi dalam pembentukan *smog* klasik atau *smog* London (Sumber: Raza et al. 2021, Bhartendu., 2013):

$$SO_2 + OH \rightarrow HOSO_2 \qquad \text{(R3-1)}$$

$$HOSO_2 + O_2 \rightarrow HO_2 + SO_3 \qquad \text{(R3-2)}$$

$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 \qquad \text{(R3-3)}$$

Aktivitas seperti pembakaran batu bara di industri, asap kendaraan, pembakaran tanaman, konstruksi, kembang api, dan asap dari tempat pembakaran batu bara merupakan sumber utama yang menambahkan partikel polutan terutama sulfur, nitrogen, dan karbon dioksida dengan konsentrasi tinggi ke atmosfer serta menghasilkan *smog* sehingga disebut juga sebagai smog asam.

Pelepasan asap dari pabrik dan kendaraan memegang peran penting dalam pembentukan *smog* yang menyebabkan polusi oleh *smog* makin meningkat (Naureen et al., 2022). Tipe *smog* ini diidentifikasi dengan tingginya konsentrasi aerosol dan sulfur dioksida. *Smog* tipe ini terutama terjadi di kota-kota besar yang masih membakar batu bara, antara lain Beijing, Shanghai, Cina, Kairo, Mesir, Belgrade, Yugoslavia, dan Calcutta. India menjadi contoh wilayah saat ini yang menjadi pusat perkotaan dengan tipe polutan *smog* London (Gaffney et al., 2009).

2. *Smog* Fotokimia

Selain *smog* London, terdapat jenis *smog* yang lainnya, yaitu *smog* fotokimia atau dikenal juga sebagai "*smog* Los Angeles" sebagai lokasi awal diketahuinya pembentukan jenis *smog* tersebut. *Smog* fotokimia ini disebut juga *smog* oksidan yang terbentuk dari reaksi fotokimia antara nitrogen oksida (NO_x) dan senyawa organik yang mudah menguap (VOC) sebagai polutan primer yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil, pembangkit listrik, dan lainnya (Manahan, S., 2000).

Smog ini diidentifikasi dari konsentrasi oksidan yang tinggi terutama ozon, serta adanya kabut tipis kecokelatan yang dapat terlihat melayang di atmosfer yang berasal dari reaksi kimia *smog*. Spesi di dalam *smog* ini merupakan hasil reaksi fotokimia di atmosfer sehingga disebut sebagai polutan sekunder yang dipengaruhi oleh intensitas sinar matahari yang mendukung terbentuknya oksidan sekunder serta aerosol. Oleh karena itu, *smog* fotokimia atau *smog* Los Angeles ini umumnya terbentuk pada saat musim kemarau dan paling sering terlihat di kota-kota berpenduduk padat yang terletak di iklim yang relatif hangat di pagi dan di sore hari setelah polutan

sekunder di udara terbentuk dengan bantuan radiasi matahari. Mexico, Rio de Janeiro, Sao Paolo, Brazil, Houston, Texas, USA, dan Santiago, Chile adalah beberapa kota utama di dunia yang hingga saat ini masih mengalami *smog* fotokimia pada periode tertentu (Manahan, S., 2000).

Sumber: Deziel (2022)

Gambar 3.1 *Fenomena Smog*

a. Komposisi *Smog* Fotokimia

Nitrat oksida (senyawa nitrogen dengan rumus NO) dan nitrogen dioksida (senyawa nitrogen lain dengan rumus kimia NO_2) sering kali dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil. Polutan ini juga dilepaskan secara alami akibat peristiwa seperti letusan gunung berapi dan terjadinya kebakaran hutan. Namun, tingginya konsentrasi polutan ini di wilayah yang padat penduduknya merupakan hal yang memprihatinkan. Hal ini karena emisi alam cenderung terus menyebar ke wilayah yang lebih luas. Ketika terkena radiasi ultraviolet, molekul NO_2 diketahui mengalami serangkaian reaksi hidrokarbon yang kompleks untuk menghasilkan komponen kabut fotokimia. Komponen tersebut meliputi campuran ozon, aldehida, asam nitrat,

peroksiasetil nitrat (singkatan: PAN) dan banyak polutan sekunder lainnya ((EPA South Australia, 2004).

Gas-gas yang terbentuk dalam jumlah yang sangat sedikit di dalam smog fotokimia termasuk oksidan sekunder ozon, PAN, serta asam anorganik sulfat dan nitrat. Pembentukan smog fotokimia sangat berkaitan dengan kondisi iklim di wilayah tertentu. Faktor meteorologi lokal yang berpengaruh terhadap pembentukan *smog* fotokimia, antara lain radiasi matahari, tutupan awan, temperatur, dan presipitasi. Faktor lainnya meliputi kecepatan angin, lapisan pencampuran atmosfer, dan topografi yang berperan dalam dispersi ozon di lapisan batas atmosfer (Gaffney et al., 2009).

b. Sumber Utama *Smog* Fotokimia

Meskipun nitrogen oksida dan VOC diproduksi secara biogenik (di alam), terdapat juga emisi antropogenik (buatan manusia) yang besar dari keduanya. Emisi alam cenderung tersebar di wilayah yang luas sehingga mengurangi dampaknya, namun emisi buatan manusia cenderung terkonsentrasi di dekat sumbernya, seperti kota (White, V., 1998).

Di Adelaide pada tahun 2000, diperkirakan 66% nitrogen oksida (NO dan NO_2) berasal dari kendaraan bermotor, dan 20% lainnya berasal dari pembakaran bahan bakar. Kendaraan bermotor menyumbang 44% emisi VOC, dan sumber-sumber area termasuk bensin dan penguapan pelarut menyumbang 33% (White, V., 1998).

c. Lokasi dan Cuaca yang Dapat Berpengaruh pada *Smog* Fotokimia Inversi Termal

Faktor yang dapat memengaruhi terjadinya *smog* fotokimia adalah inversi termal. Fenomena ini terjadi ketika lapisan udara yang lebih hangat dan ringan terjadi di atas lapisan udara yang lebih dingin dan berat, sehingga tidak terjadi pergerakan udara vertikal yang akhirnya membuat polutan terperangkap di lapisan atmosfer yang lebih rendah. Polutan yang harusnya naik ke lapisan udara yang lebih tinggi untuk mengalami proses dispersi dan dilusi menjadi

tetap berada di lapisan bawah dan menyebabkan polutan makin terakumulasi. Terperangkapnya polutan tersebut akan menyebabkan *smog* tetap terperangkap di daerah tersebut dalam jangka waktu yang lama. Jika inversi termal tidak terjadi, *smog* fotokimia di daerah tersebut akan segera hilang dalam jangka waktu dekat (Rani et al., 2011).

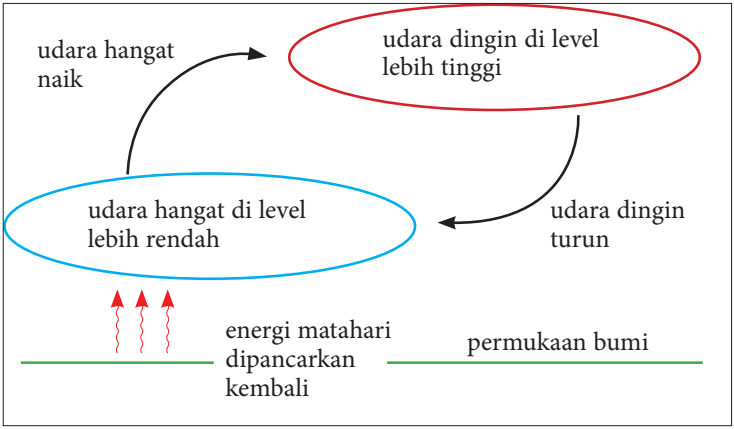
Biasanya, lapisan udara yang paling dekat dengan permukaan Bumi lebih hangat dibandingkan udara yang lebih tinggi di atmosfer, karena permukaan Bumi menyerap panas Matahari dan memancarkannya kembali sebagai panas. Udara dingin pada tingkat yang lebih tinggi kemudian tenggelam, dihangatkan, dan berpindah ke atas dalam siklus konveksi (Gambar 3.2). Kondisi ini disebut ”tidak stabil” dan membantu membawa polutan ke atas, sehingga polutan tersebut tersebar dan terdilusi. Siklus ini biasanya dibantu oleh kecepatan angin yang lebih tinggi. Namun, jika hal sebaliknya terjadi, yaitu pembalikan suhu, wilayah perkotaan akan mengalami kabut fotokimia dalam jangka waktu yang lama (White, 1998).

Inversi terjadi ketika lapisan udara hangat memerangkap lapisan udara dingin, yang mengandung polutan, di dekat permukaan tanah. Hal ini menghambat kemampuan polutan untuk naik ke atmosfer dan menyebar. Setelah inversi terbentuk, kabut asap yang ada akan tetap berada dekat permukaan tanah, sehingga memaksimalkan dampak buruknya.

Ada dua proses besar yang memungkinkan terjadinya inversi dan keduanya biasanya disertai dengan kecepatan angin yang rendah. Proses pertama, adveksi, terjadi ketika lapisan atas udara hangat terhembus, sehingga lapisan udara dingin di bawahnya terperangkap. Kondisi ”stabil” ini dapat berlangsung selama beberapa hari. Variasinya adalah ketika lapisan udara yang lebih dingin, seperti angin laut, terhembus ke bawah lapisan yang lebih hangat, sehingga menimbulkan efek yang sama (Rani et al., 2011; White, 1998).

Proses kedua, inversi radiasi, biasanya terjadi dalam semalam. Tanah mendingin dan pada gilirannya mendinginkan lapisan udara

yang paling dekat dengannya, sehingga lapisan udara bagian bawah menjadi lebih dingin daripada udara di atasnya, sehingga terjadi inversi ((EPA South Australia, 2004).



Sumber: EPA South Australia (2004)

Gambar 3.2 Siklus Konveksi

d. Topografi

Topografi wilayah sekitar kota dapat sangat memengaruhi pembentukan kabut fotokimia. Karena terbatasnya pergerakan udara, kota yang berada di lembah dapat mengalami masalah yang mungkin tidak dialami oleh kota yang terletak di dataran terbuka.

Kota seperti Adelaide dapat mengalami pembatasan pergerakan udara karena posisinya antara pantai dan Perbukitan Adelaide (EPA South Australia (2004); Rani et al., 2011).

e. Pengendalian *Smog* Fotokimia

Cara untuk meminimalkan tingkat *smog* fotokimia adalah dengan menghilangkan penggunaan bahan bakar fosil dengan menggunakan sumber listrik yang tidak menimbulkan polusi atau berkelanjutan, seperti tenaga nuklir, tenaga air, dan tenaga angin.

Reaksi kimia smog fotokimia

Dekomposisi NO_2 oleh sinar UV:

$NO_2 + hv \rightarrow NO + O$ (R3-4)

Pembentukan ozon:

$O + O_2 \rightarrow O_3$ (R3-5)

Siklus ulang pembentukan NO_2:

$O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2$ (R3-6)

Produksi molekul VOC reaktif melalui reaksi dengan hidroksil radikal:

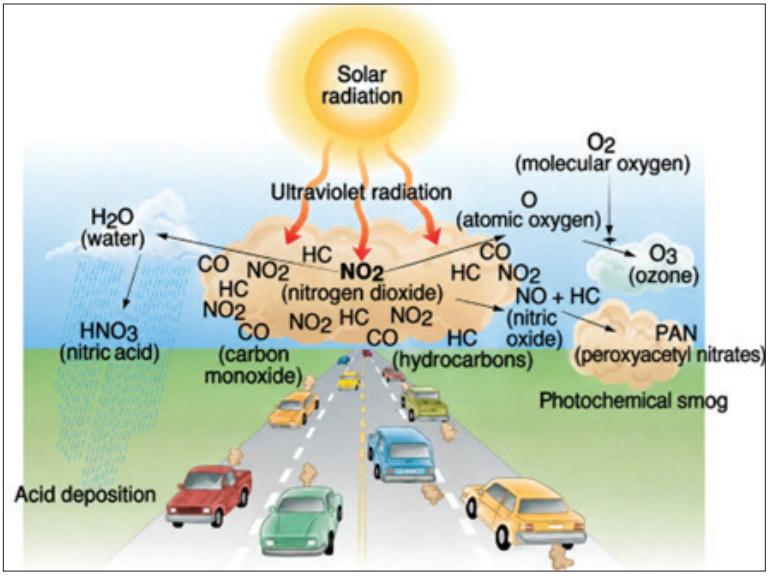
$RH + OH \rightarrow R. + H_2O$ (R3-7)

Pembentukan radikal peroksil:

$R. + O_2 \rightarrow RO_2$ (R3-8)

(Colbeck & Mackenzie, 1994; Raza et al. 2021)

Dari rangkaian reaksi ini terlihat jelas bahwa makin tinggi konsentrasi VOC dapat mengakibatkan pembentukan *smog* yang memengaruhi udara kualitas dengan menghasilkan partikel di udara dan ozon di permukaan tanah. *Smog* fotokimia juga bergantung pada polutan primer dan polutan sekunder. Oleh karena industrialisasi yang pesat dan peningkatan energi dan kebutuhan transportasi di seluruh dunia, konsentrasi VOC di atmosfer dan polutan organik lainnya makin meningkat. Oleh karena itu, *smog* fotokimia telah menjadi masalah lingkungan yang umum di banyak kota, baik di negara berkembang maupun negara maju di seluruh dunia, dan memaksa pemerintah untuk mengembangkan strategi mitigasi (Rani et al., 2011).



Sumber: Rani et al. (2011)

Gambar 3.3 Skema Pembentukan Smog Fotokima

3. *Smog Polish*

Smog jenis lain yang bukan dari jenis *smog* fotokimia maupun *smog* sulfur (London), ditemukan belum lama ini terbentuk di negara-negara Eropa terutama Polandia saat musim dingin. *Smog* ini disebut sebagai *smog Polish* yang tersusun oleh partikulat terutama PM_{10}, $PM_{2.5}$, dan PM_1, serta *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAH) termasuk *benzo(a)pyrene* (Naureen et al., 2022).

Smog ini dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar padat dalam suatu tungku yang tidak dilengkapi dengan sistem pengelolaan gas buang, salah satunya adalah tungku pembakar dari aktivitas rumah tangga. *Smog* ini banyak terbentuk saat musim dingin di negara-negara Eropa. Berbeda dengan tipe *smog* lainnya, *smog* ini dapat terbentuk pada temperatur rendah dan tekanan atmosfer tinggi serta angin yang pelan dengan konsentrasi PM_{10} yang tinggi sebagai komponen utama (Naureen et al., 2022; Raza et al., 2021).

Sumber: Zhang et al. (2015)

Gambar 3.4 Pemandangan Los Angeles Civic Center yang Tertutup Kabut Asap pada Tahun 1948

Tabel 3.1 Perbandingan antara Episode Polusi Historis di London, Los Angeles, dan Beijing

	London	Los Angeles	Beijing
Tipe *smog*	Sulfur	Fotokimia	Fotokimia
Waktu kejadian	1800–1950	1940–saat ini	1990–saat ini
Kondisi meteorologi	Lapisan inversi kuat, angin lemah, berawan, musim dingin	Cerah, hangat, kering, lapisan inversi, musim kemarau	Angin lemah dari selatan, sepanjang tahun
Polutan	SO_2, PM, jelaga	NO_x, VOC, ozon, dan PM	NO_x, VOC, SO_2, PM
Sumber polutan	Pembakaran batu bara dan produksi listrik	Kendaraan	Kendaraan dan industri

Sumber: Zhang et al. (2015)

B. Metode Pengukuran *Smog*

Metode deteksi bermacam-macam polutan primer dan sekunder yang dapat menyebabkan *smog* telah dirangkum pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Metode Pengukuran Polutan Komponen Smog

Polutan Primer			
No.	Polutan	Metode Monitoring	Deskripsi
1.	NO_x	Pasif	1. Filter yang diimpregnasi dengan Trietanolamin (TEA) atau sodium iodida/sodium hidroksida 2. Dosimeter kalorimetrik yang dilengkapi dengan filter terimpregnasi
		Integrasi	*1. Impinger* Saltzman atau *bubblers* dengan deteksi kalorimetrik menggunakan campuran N-etilendiamin dihidroklorida, asam sulfanilat, dan asam asetat. 2. Sampling dengan filter di awal lalu dengan filter terimpregnasi TEA berbahan selulosa untuk dianalisis dengan Ion Kromatografi.
		Kontinyu	*1. Chemiluminescence* 2. Sensor elektrokimia 3. Spektroskopi fotoakustik 4. Absorpsi fotometer
2.	VOC	Pasif	1. Karbon aktif, *tenax*, dan sorben desorpsi termal lain dilanjutkan dengan GC-MS. *2. Polyurethane foam* (PUF) atau resin XAD dengan sampel diekstraksi menggunakan pelarut organik sebelum dianalisis.
		Integrasi	*1. Canister*, kantong gas, atau *carbotrap* umum digunakan untuk hidrokarbon. 2. Filter/PUF, filter/*tenax* terutama digunakan untuk hidrokarbon poliaromatik (PAH). 3. Filter diimpregnasi dengan dinitrofenil hidrazin (DNPH) atau pemerangkapan *cryogenic* untuk karbonil. 4. Filter quartz atau filter basis yang dilapisi (coated).
		Kontinyu	1. Hidrokarbon dengan GC-FID otomatis *2. Proton transfer reaction* (PTR)-MS *3. Chemical ionization Mass Spectrometry* (CIMS)

Polutan Sekunder			
No.	Polutan	Metode Monitoring	Deskripsi
1.	O_3	Pasif	1. Impregnasi dengan nitril atau nitrat dilanjutkan dengan analisis IC 2. Strip yang telah di*treatment* dengan bahan yang bereaksi dengan ozon kemudian dilakukan perbandingan skala warna 3. Impregnasi filter dengan kalium iodida (KI)
		Integrasi	1. Sampling dengan filter awal dilanjutkan dengan filter selulosa yang diimpregnasi KI untuk analisis kalorimetrik dengan KOH
		Kontinyu	*1. Chemiluminescence* *2. UV absorption*
2.	PAN	Kontinyu	*1. Chemical ionization Mass Spectrometry* (CIMS)
3.	Aldehid	Integrasi	1. Substrat yang dilapisi dinitrofenil hidrazin (DNPH) untuk membentuk hidrazone yang diikuti dengan analisis HPLC. 2. Tabung yang dilapisi natrium bisulfit ($NaHSO_3$)
		Kontinyu	1. GC-FID otomatis

Sumber: Raza et al. (2021)

C. Dampak *Smog* Terhadap Lingkungan dan Kesehatan

Smog fotokimia dapat memberikan dampak pada lingkungan, kesehatan manusia, hingga kerusakan material. Dampak utama yang dapat dilihat secara langsung (visual) adalah kabut kecokelatan yang berada di atas wilayah perkotaan. Warna kecokelatan disebabkan oleh partikel cair dan padatan yang berukuran sangat kecil yang memendarkan cahaya (EPA South Australia, 2004).

Senyawa NO_x, ozon, dan juga peroksiasetil nitrat (PAN) dapat mengurangi, bahkan hingga menghentikan pertumbuhan tumbuhan dengan mengurangi proses fotosintesis. Ozon dalam jumlah kecil dapat menyebabkan hal ini, tetapi PAN bersifat lebih toksik lagi terhadap tumbuhan.

Smog dapat menyebabkan masalah pada jantung dan paru-paru, iritasi mata, gangguan pernapasan, batuk, dan sesak pada manusia. Hal ini disebabkan oleh polutan-polutan yang terkandung dalam smog itu sendiri (NO_x, VOC, ozon, dan PAN). Ozon juga dapat merusak berbagai campuran material. Ozon dapat menyebabkan keretakan pada karet, mengurangi kekuatan tekstil, memudarkan warna pada kain, dan keretakan cat (Colbeck & Mackenzie, 1994; Raza et al., 2021).

Smog fotokimia dapat berdampak pada lingkungan, kesehatan masyarakat, dan bahkan berbagai material. Efek utama yang terlihat adalah kabut cokelat yang terlihat di banyak kota. Semburat cokelat disebabkan oleh partikel cair dan padat yang sangat kecil yang menghamburkan cahaya. Berikut ini beberapa efek dari *smog* fotokimia (Colbeck & Mackenzie, 1994; Naureen et al., 2022; Raza et al., 2001; EPA South Australia, 2004).

1) Menyebabkan iritasi mata: senyawa yang mungkin mengakibatkan iritasi mata meliputi formaldehid, akrolein, PAN, dan *peroxybenzoyl nitrate*.
2) Kerusakan tanaman: bahan kimia, seperti nitrogen oksida, ozon, dan peroksiasetil nitrat (PAN), dapat menimbulkan efek berbahaya pada tanaman. Zat-zat tersebut dapat mengurangi atau bahkan menghentikan pertumbuhan tanaman dengan cara mengurangi fotosintesis. Ozon, bahkan dalam jumlah kecil, dapat mencapai hal ini, namun PAN bahkan lebih beracun bagi tanaman dibandingkan ozon.
3) Penurunan visibilitas: hal ini menjadi efek yang umum ditemukan akibat *smog* fotokimia. Partikel aerosol penyusun *smog* mengandung unsur-unsur karbon, oksigen, hidrogen, nitrogen, sulfur, dan halida.
4) Kerusakan material: hal ini terutama disebabkan oleh senyawa ozon sebagai komponen *smog*. Efek ekonomi yang penting dari *smog* adalah kerusakan pada permukaan mobil serta ban mobil. Untuk mengatasi permasalahan ini kemudian digunakan bahan antiozon.

5) Kesehatan: kekhawatiran terbesar mengenai *smog* fotokimia adalah dampaknya terhadap kesehatan masyarakat. Dampak polutan primer dan sekunder utama pada *smog* disajikan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Komponen Smog dan Dampaknya pada Kesehatan

Polutan	Dampak
Nitrogen oksida	Berkontribusi pada gangguan jantung dan paru-paru; Berkaitan dengan penurunan resistensi terhadap infeksi
Volatile organic compound (VOC)	Menyebabkan iritasi mata; Mengakibatkan masalah pernapasan; Beberapa senyawa bersifat karsinogenik
Ozon	Batuk-batuk dan sesak napas; Iritasi mata; Gangguan pernapasan (khususnya asma)
Peroxyacetyl nitrate (PAN)	Iritasi mata; Gangguan pernapasan

Sumber: Naureen et al. (2022)

Sumber: Zhang et al. (2015)

Gambar 3.5 Pemandangan Kampus Universitas Peking pada Hari-Hari yang Bersih dan Tercemar

Sumber: Bartington and Bloss (2022)

Gambar 3.6 Kejadian Polusi Udara Tinggi di London pada Januari 2022

Sumber: Priyadarshi (2018)

Gambar 3.7 Polusi Udara oleh Smog di Delhi

Daftar Pustaka

Bartington, S., & Bloss, W. (2022, December 9). *70 years on from London's Great Smog, we still need cleaner air to protect health*. The Conversation. https://theconversation.com/70-years-on-from-londons-great-smog-we-still-need-cleaner-air-to-protect-health-196239

Bhartendu, A. (2013). Photochemical air pollution and its effects on plant and human life. *International Journal of Chemical Sciences*, *11*(4), 1907–1910.

Colbeck, I., & Mackenzie, A. R. (1994). *Air pollution by photochemical oxidants* (Air Quality Monographs, Vol. 1). Elsevier.

Deziel, C. (2022). *How is photochemical smog formed*? Sciencing. https://www.sciencing.com/photochemical-smog-formed-6505511/

EPA South Australia. (2004). Photochemical smog—what it means for us. https://mhsapes.weebly.com/uploads/1/3/4/1/13416460/auepa_photochemical_smog.pdf

Foust, R. (n.d.). *Photochemical smog*. Middle Tennessee State University. http://mtweb.mtsu.edu/nchong/Smog-Atm1.htm

Gaffney, J. S., Marley, N. A., & Frederick, J. E. (2009). Formation and effect of smog. In *Environmental and ecological chemistry* (Vol. 3). Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). https://www.eolss.net/sample-chapters/c06/E6-13-02-08.pdf

Manahan, S. E. (2000). *Environmental chemistry* (6th ed.). CRC Press.

Naureen, I., Saleem, A., Aslam, S., Zakir, L., Mukhtar, A., Nazir, R., & Zulqarnain, S. (2022). Potential impact of smog on human health. *Haya: The Saudi Journal of Life Sciences*, *7*(3), 78–84.

Priyadarshi, N. (2018, October 30). *Delhi air quality turns 'severe' for first time this season*. The Indian Express. https://indianexpress.com/article/delhi/air-quality-turns-severe-as-stubble-burning-intensifies-in-haryana-punjab-5425569/

Rani, B., Singh, U., Chuhan, A. K., Sharma, D., & Maheswari, R. (2011). Photochemical smog pollution and its mitigation measures. *Journal of Advanced Scientific Research*, 2(4), 28–33.

Raza, W., Saeed, S., Saulat, H., Gul, H., Sarfraz, M., Sonne, C., Sohn, Z.-H., Brown, J. C., & Kim, H.-K. (2021). A review on the deteriorating situation of smog and its preventive measures in Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, *279*, Article 123676.

White, V. (1998). *Air emissions inventory for the Adelaide airshed 1995*. Environment Protection Agency, South Australia.

Zhang, R., Wang, G., Guo, S., Zamora, M. L., Ying, Q., Lin, Y., Wang, W., Hu, M., & Wang, Y. (2015). Formation of urban fine particulate matter. *Chemical Reviews*, *115*(8), 3803–3855.

Bab IV

VOG | Volcano Smog Menelisik Ancaman Abu Vulkanis terhadap Kesehatan Manusia dan Lingkungan

Saipul Hamdi dan Wiwik Setyawati

Vog berasal dari kata *volcano* dan *smog*. *Vog* adalah kabut vulkanis yang terbentuk saat sulfur dioksida (SO_2) dan beberapa jenis gas serta partikulat yang dihasilkan dari aktivitas gunung berapi bereaksi dengan uap air dan oksigen dengan bantuan sinar matahari.

Kabut vulkanis mengandung asam sulfat dan senyawa sulfat lainnya. Diketahui bahwa senyawa asam sulfat ataupun senyawa sulfat lainnya bersifat korosif dan mengganggu keseimbangan lingkungan dan biota air. Dalam jumlah yang banyak, senyawa sulfat menyebabkan fenomena hujan asam yang mengganggu

S. Hamdi & W. Setyawati
Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: saip001@brin.go.id

© 2026 Editor & Penulis

Hamdi, S. & Setyawati, W. (2026). VOG | Vulcano Fog Menelisik ancaman abu vulkanis terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (55–74). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1808
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

produktivitas padi dan palawija. Tanaman yang terkena hujan asam tersebut akan menjadi layu, kering, dan akhirnya mati. Jika terjadi dalam skala besar, tentu saja hal ini akan mengganggu ketahanan pangan nasional. Namun demikian, fenomena hujan asam tidak hanya disebabkan oleh debu vulkanis erupsi gunung berapi, tetapi juga disebabkan oleh penggunaan bahan bakar fosil yang berlebihan sehingga alam tidak memiliki kemampuan yang cukup untuk menetralisir kandungan asam di atmosfer.

Debu vulkanis merupakan gabungan dari beberapa partikel dan gas yang dapat berdampak buruk bagi manusia karena mengandung beberapa senyawa berbahaya, misalnya karbon dioksida, sulfurdioksida, hydrochloric acid, dan *hydrofluoric acid*. Erupsi gunung api selain menghasilkan debu vulkanis juga mengeluarkan bebatuan dalam berbagai ukuran. Meskipun dapat meningkatkan kesuburan tanah karena banyak mengandung mineral dan unsur-unsur penyubur tanah, debu vulkanis juga mengandung beberapa jenis bahan berbahaya terutama yang bersifat logam, seperti arsenik, antimon, kadmium, kobalt, kromium, dan merkuri. Batuan vulkanis dapat berupa padatan ataupun cairan yang dikenal dengan nama lava, dan lava dapat bersifat panas maupun dingin. Proses pengeluaran batuan vulkanis dari dalam perut bumi berlangsung relatif singkat namun dapat menghasilkan dampak yang luas.. Oleh karena itu, pembahasan debu vulkanis atau *vog* tidak lepas dari aktivitas gunung api yang berjajar menyusun *ring of fire*, terutama ketika terjadi letusan yang dahsyat.

A. *Ring Of Fire*

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki risiko bencana vulkanik tertinggi di dunia karena letak geografisnya yang berada di sepanjang jalur *Pacific Ring of Fire* (Cincin Api Pasifik). Di dalam sirkum ini, Indonesia memiliki sedikitnya 127 gunung berapi aktif, di mana 69 di antaranya dipantau secara intensif dan real-time selama 24 jam oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) melalui sistem *Multiplatform Application for Geohazard Mitigation and Assessment* (MAGMA) Indonesia (PVMBG, 2026).

Ring of fire Indonesia terbentang dari Pulau Sumatra, Jawa, Sulawesi, Nusa Tenggara hingga Maluku, dan luas ancaman erupsinya mencapai 16.670 km^2 (Annisha, 2017). Erupsi yang dahsyat tentu saja akan melepaskan banyak senyawa sulfur ke udara permukaan, bahkan dapat mencapai lapisan troposfer atas maupun stratosfer. Erupsinya akan berpotensi meningkatkan jumlah *vog* di udara, baik dalam skala lokal maupun global.

Beberapa gunung berapi aktif di dalam *ring of fire* dunia yang tercatat karena letusannya yang sangat dahsyat di antaranya adalah letusan Gunung Tambora (1815), Gunung Krakatau (1883), Gunung Novarupta (1912), Gunung Saint Helens (1980), Gunung Nevado del Ruiz (1985), dan Gunung Pinatubo (1991). Selain letusan yang dahsyat, gempa bumi hebat juga sering terjadi di dalam *ring of fire* di antaranya adalah gempa Chili (1960), gempa Alaska (1964), gempa Chili (2010), gempa Jepang (2011), serta gempa yang memicu tsunami Samudra Hindia (2004).

Selain erupsi gunung berapi, keberadaan Indonesia di dalam *ring of fire* menyimpan potensi energi panas bumi yang cukup besar dan dapat dimanfaatkan sebagai energi terbarukan menggantikan energi bahan bakar fosil yang jumlahnya makin berkurang (Nurwahyudin & Harmoko, 2020). Hingga tahun 2014, pemanfaatan energi panas bumi hanya 248 MW atau sekitar 1,15% dari jumlah potensi energi panas bumi yang tersedia di Indonesia (Hakim et al., 2023).

Jumlah total potensi energi panas bumi yang tersedia di Indonesia diperkirakan sebesar 23,7 GW atau 40% dari cadangan panas bumi dunia. Pada tahun 2017 telah teridentifikasi 331 titik potensi panas bumi yang tersebar di 30 provinsi, atau membentang dari Pulau Sumatra, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Sulawesi, Maluku, hingga Papua. Potensi energi panas bumi terbesar tersedia di Pulau Sumatra (13.516 MW) dan potensi energi panas bumi terkecil tersedia di Papua (75 MW) (Fandari et al., 2014). Hingga tahun 2021, jumlah pembangkit listrik tenaga panas bumi yang telah beroperasi di Indonesia adalah sejumlah 17 PLTP.

Sumber: U.S. Geological Survey (2016)

Gambar 4.1 Sebaran Gunung Api di Indonesia (*Ring of Fire*)

Beberapa erupsi gunung berapi di Indonesia yang tercatat di dalam sejarah adalah sebagai berikut.

1) Gunung Merapi (Yogyakarta): terjadi erupsi pada tahun 2023, 2020, 2010 dan beberapa erupsi lainnya. Gunung Merapi termasuk gunung berapi aktif yang memiliki siklus erupsi bulanan hingga 2–5 tahunan. Sejak tahun 1548, Gunung Merapi telah melakukan erupsi sebanyak 68 kali. Erupsi Gunung Merapi umumnya disertai dengan awan panas yang disebut oleh masyarakat setempat sebagai *wedhus gembel*. Selain suhu yang tinggi dan mencapai 500–600 ^{o}C di permukaan bumi, awan panas juga mengandung gas fluor, belerang, gas asam (H_2S), magnesium, dan kalium yang bersifat racun.
2) Gunung Galunggung (Jawa Barat): terjadi erupsi pada tahun 1982–1983, 1918, 1894, dan 1822. Pada erupsi tahun 1982, erupsi Gunung Galunggung mengeluarkan asap hitam bergumpal-gumpal membumbung hingga ketinggian 8 km disertai semburan benda pijar setinggi 50–100 m. Hujan abu, batu, dan pasir, serta lahar mengakibatkan kerusakan infrastruktur dan permukiman masyarakat di sekitarnya.

3) Gunung Agung (Bali): terjadi erupsi pada tahun 1808, 1821, 1843, 1963, dan 2018 (Indra, 2018). Abu panas dan gas melambung hingga mencapai ketinggian 10 km. Ketinggian kolom erupsi pada erupsi tahun 2018 adalah 2.000–2.500 m di atas puncak kawah, disertai dengan asap dan abu vulkanis berwarna kelabu.

Masih ada banyak erupsi kecil gunung berapi di Indonesia, namun tidak menimbulkan dampak serius jangka panjang, baik bagi masyarakat sekitar maupun skala global.

B. Beberapa Erupsi Gunung Berapi yang Sangat Dahsyat

Di dalam subab ini akan dibahas lima gunung berapi dahsyat yang erupsinya menghasilkan senyawa sulfur dalam jumlah yang sangat banyak ke lapisan stratosfer. Tidak semua erupsi gunung berapi tercatat di dalam sejarah secara baik, karena sangat bergantung pada kemajuan teknologi pada saat tersebut.

1. Gunung Tambora, Indonesia (1815)

Gunung Tambora atau Tamboro terletak di Pulau Sumbawa, Nusa Tenggara Barat, Indonesia, dan merupakan salah satu gunung tertinggi di Indonesia pada masa lalu. Ketinggiannya pada masa lalu mencapai 4.300 m (Stothers, 1984) dan erupsi pada tahun 1815 dengan kekuatan 7 VEI (*Volcanic Explosivity Index*).

Erupsi Gunung Tambora pada tahun 1815 dilaporkan telah menyebabkan lebih dari 71.000 jiwa kehilangan nyawanya di Sumbawa dan Lombok akibat dampak langsung maupun kelaparan yang terjadi setelahnya, menjadikannya sebagai erupsi gunung berapi paling mematikan dalam sejarah modern (Oppenheimer, 2003). . Erupsi yang dahsyat tersebut menghasilkan dentuman suara yang terdengar hingga Kepulauan Maluku, Batavia, hingga Sumatra Selatan.

Hujan abu tebal menutupi banyak pulau yang jauh dari lokasi erupsi. Semua tumbuhan di pulau hancur. Pohon yang tumbang

bercampur dengan abu batu apung masuk ke laut dan membentuk rakit dengan jarak lintas melebihi 5 km (Stothers, 1984). Akibat letusan yang dahsyat ketinggian Gunung Tambora saat ini adalah 2.851 m, dan letusan terakhir yang tercatat terjadi pada tahun 1967 tidak disertai dengan ledakan/gempa (VEI = 0).

Gunung Tambora mengeluarkan sekitar 50 km^3 lahar pada letusan besarnya (Sparks et al., 2005) dan ribuan ton debu yang membumbung hingga ketinggian 42 km. Sejumlah 18–180 km^3 material vulkanis juga dilepaskan pada letusan selama tiga malam (Geria, 2015).

Sumber: Global Volcanism Program (2024)

Gambar 4.2 Erupsi Gunung Tambora pada tahun 1815 menghasilkan kaldera yang sangat besar

Abu vulkanis yang dihasilkan pada erupsi Gunung Tambora mencapai lapisan stratosfer hingga ketinggian 43 km (Oppenheimer, 2003), dan senyawa sulfur yang diinjeksikan tersebut menyebabkan penyimpangan/anomali iklim global. Dengan

menggunakan beberapa metode perhitungan, jumlah sulfur yang dilepaskan ke lapisan stratosfer berkisar 10–20 Tg S (Oppenheimer, 2003). Senyawa sulfur kemudian tersebar di lapisan stratosfer hingga mencapai jarak ribuan km dalam tenggang waktu selama beberapa tahun dan memberikan dampak selama bertahun-tahun.

2. Gunung Krakatau, Indonesia (1883)

Gunung Krakatau yang erupsi pada tahun 1883 dengan skala 6 VEI, setara dengan 30.000 bom atom seperti yang digunakan pada Perang Dunia II. Erupsi menghasilkan tsunami setinggi 40 meter yang sangat kuat, hingga mampu menghempaskan sebuah bongkahan batu karang raksasa seberat 600 ton dari laut ke pesisir daratan Anyer (Simkin & Fiske, 1983). Selain memicu gelombang tsunami dahsyat tersebut, erupsi Gunung Krakatau juga menyemburkan awan panas serta melontarkan jutaan ton material vulkanik ke atmosfer, dengan suara letusan yang terdengar sampai ke Afrika yang jaraknya sekitar 4.650 km.

Erupsi dahsyat Gunung Krakatau pada tahun 1883 menyemburkan material vulkanik dan gas sulfur dalam jumlah sangat besar hingga mencapai lapisan stratosfer. Kolom erupsi diperkirakan menjulang hingga puluhan kilometer di atas permukaan bumi, sementara abu vulkanik dan aerosol sulfat kemudian tersebar secara global mengikuti sirkulasi atmosfer (Robock, 2000; Self & Rampino, 1981). Sebaran aerosol tersebut mengurangi intensitas radiasi Matahari yang mencapai permukaan Bumi sehingga menyebabkan pendinginan global sekitar 0,51,2°C selama beberapa tahun setelah erupsi serta memengaruhi kondisi iklim di berbagai belahan dunia (Robock, 2000). Selain itu, hujan yang membawa abu vulkanik di beberapa wilayah sekitar gunung turut menurunkan kualitas air sehingga tidak layak dikonsumsi tanpa pengolahan terlebih dahulu.

Jumlah korban jiwa akibat erupsi Gunung Krakatau diperkirakan mencapai sekitar 36.000 orang, meskipun beberapa publikasi mengemukakan bahwa jumlah sebenarnya kemungkinan lebih tinggi karena banyak korban tidak terdokumentasikan secara resmi (Global

Volcanism Program, 2024; Simkin & Fiske, 1983). Wilayah pesisir di sekitar Selat Sunda mengalami kerusakan paling parah, terutama akibat tsunami besar yang dipicu oleh runtuhan tubuh gunung dan aktivitas vulkanik selama erupsi tersebut.

Sumber: U.S. Geological Survey, 1999 dimodifikasi dari Simkin dan Fiske (1983)

Gambar 4.3 Perubahan morfologi Kepulauan Krakatau akibat erupsi tahun 1883 dan kemunculan Gunung Anak Krakatau sejak tahun 1927.

3. Gunung Mont Peleé, Karibia (1902)

Gunung Mont Pelée yang memiliki ketinggian sekitar 1.397 m mengalami erupsi besar pada 8 Mei 1902. Erupsi tersebut menghancurkan Kota Saint-Pierre, yang pada masa itu dikenal sebagai Paris of

the Caribbean karena perkembangan ekonomi dan budayanya. Kota tersebut luluh lantak akibat terjangan awan panas (p*yroclastic flow* atau *nuée ardente*) yang bergerak sangat cepat dengan suhu tinggi, sehingga menewaskan sekitar 30.000 penduduk hanya dalam waktu singkat (Global Volcanism Program, n.d.; Lacroix, 1904).

Sumber: Rosen (2015)

Gambar 4.4 Perbandingan Kondisi Kota Saint-Pierre Sebelum dan Sesudah Erupsi Gunung Mont Peleé di Pulau Martinique, Karibia, pada Tahun 1902

Aktivitas vulkanik telah diawali oleh hujan abu sejak awal Mei 1902 dan diikuti oleh peningkatan intensitas erupsi pada hari-hari berikutnya. Endapan abu vulkanik yang tebal menyebabkan jarak pandang menurun drastis, bahkan menimbulkan kondisi gelap pada siang hari di sekitar Saint-Pierre. Tipe letusan Gunung Mont Pelée kemudian menjadi acuan dalam klasifikasi vulkanologi dan dikenal sebagai letusan Peléan (*Peléan eruption*) karena didominasi oleh pembentukan kubah lava yang diikuti runtuhan serta aliran piroklastik yang sangat destruktif.

Pada puncak erupsi tanggal 8 Mei 1902, kolom erupsi dan awan piroklastik berkembang sangat cepat sehingga menutupi langit di

wilayah sekitar gunung. Abu vulkanik tersebar mengikuti arah angin ke berbagai wilayah di sekitar Pulau Martinique, sementara partikel yang lebih halus memasuki atmosfer atas dan dapat terbawa hingga jarak yang jauh (Lacroix, 1904; Sigurdsson et al., 2015).

4. Gunung Nevado del Ruiz, Kolombia (1985)

Gunung Nevado del Ruiz memiliki ketinggian sekitar 5.321 m di atas permukaan laut dan terletak sekitar 130 km di sebelah barat Bogotá, Kolombia. Gunung berapi yang puncaknya tertutup gletser ini meletus pada 13 November 1985 dengan magnitudo erupsi sebesar Volcanic Explosivity Index (VEI) 3 (Global Volcanism Program, 2024).

Meskipun skala erupsinya tergolong sedang, panas yang dihasilkan mampu mencairkan sebagian lapisan es dan salju di puncak gunung sehingga membentuk lahar vulkanik yang mengalir deras mengikuti lembah-lembah sungai. Lahar tersebut menghancurkan hampir seluruh Kota Armero dan menewaskan sekitar 25.000 penduduk. Di Kota Chinchiná, lahar dan aliran debris juga menyebabkan sekitar 1.900 korban jiwa (Global Volcanism Program, 2024; Pierson et al., 1990).

5. Gunung Unzen, Jepang (1792)

Gunung Unzen terletak di Semenanjung Shimabara, Prefektur Nagasaki, Jepang. Gunung ini mengalami erupsi besar pada tahun 1792 yang memicu longsoran lereng ke arah Laut Ariake sehingga menghasilkan tsunami dengan tinggi gelombang mencapai sekitar 57 m. Bencana tersebut menewaskan sekitar 15.000 orang dan dikenal sebagai bencana vulkanik paling mematikan dalam sejarah Jepang (Global Volcanism Program 2024). Volume lava yang dihasilkan pada erupsi tahun 1792 diperkirakan mencapai sekitar 20 juta m^3, sedangkan volume abu vulkanik yang terlontar ke atmosfer tidak terdokumentasikan secara pasti. Hampir dua abad kemudian, Gunung Unzen kembali aktif pada tahun 1990. Selama periode erupsi 1991−1995 terjadi pertumbuhan kubah lava yang disertai runtuhan kubah berulang sehingga menghasilkan aliran piroklastik dengan

total volume mencapai ratusan juta meter kubik. Salah satu awan panas yang terjadi pada 3 Juni 1991 menewaskan 43 orang, termasuk para ilmuwan dan jurnalis yang sedang melakukan pengamatan di sekitar gunung (Yamamoto et al., 1993).

C. Dampak *Vog* Terhadap Kesehatan

Sebagai bagian dari polusi udara yang berupa kombinasi dari gas vulkanis dan partikel asap, *vog* memberikan dampak yang tidak sehat terhadap manusia dan lingkungan sekitar. Partikel-partikel halus di dalam *vog* akan mengganggu sistem pernapasan seperti batuk dan sesak napas. Iritasi mata dan kulit, sakit kepala dan kelelahan merupakan dampak lain apabila terpapar *vog* dalam jumlah yang banyak. Bahkan, paparan *vog* dalam jangka panjang dapat meningkatkan risiko penyakit pernapasan, kanker, dan kardiovaskuler. Mueller et al. (2020) melaporkan beberapa dampak abu vulkanis terhadap kesehatan manusia dari beberapa letusan gunung berapi di seluruh dunia. Dampak yang paling umum dan terjadi secara langsung adalah terkait dengan pernapasan, terutama untuk wilayah yang dekat dengan sumber letusan.

Vog berdampak pada kesehatan, terutama terhadap orang-orang yang memiliki masalah dengan sistem pernapasannya. Salah satu senyawa yang terkandung dalam *vog* adalah sulfur dioksida (SO_2), yang tidak berwarna, tetapi memiliki bau yang khas, dan bersifat mengganggu.

Pada umumnya, senyawa gas ini akan mulai terasakan pada konsentrasi 0,3–1,4 ppm dan mudah terlihat pada 3 ppm (Wellburn, 1994). Senyawa ini bersifat stabil dan memiliki bobot 2 kali lebih berat daripada udara (Lide, 2003) serta sangat larut di dalam air (Gangolli, 1999).

Senyawa SO_2 yang terkandung di dalam *vog* dapat menyebabkan sakit perut dan mual, serta berpotensi menyebabkan kerusakan pada saluran pernapasan dan paru-paru. Bahkan, SO_2 dapat secara cepat menyebabkan ketidaksadaran pada konsentrasi lebih dari 100 ppm, dan berpotensi menyebabkan kematian. Sementara itu, pada

kosentrasi yang rendah (2–5 ppm) sulfur dioksida yang terkandung di dalam *vog* dapat menyebabkan iritasi pada kulit, mata, hidung, bahkan tenggorokan. Selain gejala-gejala tersebut, *vog* juga dapat menyebabkan gangguan kesehatan berupa sakit kepala, gangguan pernapasan, mata berair, sakit tenggorokan, rasa lelah, dan gejala flu seperti demam, dan sebagainya.

Sementara itu, H_2S yang juga terkandung di dalam *vog* pada konsentrasi lebih dari 100 ppm dapat menyebabkan kelelahan indra penciuman. Bahkan, pada konsentrasi yang sangat tinggi (lebih dari 500 ppm), gas ini dapat menyebabkan ketidaksadaran ataupun kematian dalam hitungan menit.

Sebagian orang akan langsung bereaksi pada konsentrasi H_2S yang rendah (2–5 ppm) berupa iritasi pada mata, sakit kepala, mual, dan masalah pernapasan pada penderita asma. Gas H_2S merupakan senyawa gas yang tidak berwarna, tetapi berbau seperti telur busuk. Pada konsentrasi 4–46% volume (Sax & Lewis, 1991), gas ini relatif mudah terbakar dan menghasilkan api dengan warna biru-pucat.

Tabel 4.1 Dampak Paparan H_2S terhadap Kesehatan

Batas Paparan (ppm)	Efek Kesehatan
0,00011–0,00033	Konsentrasi latar belakang yang paling umum.
0,01–1,5	Ambang batas mulai tercium seperti bau telur busuk.
2–5	Paparan yang terlalu lama dapat menyebabkan mual, mata berair, sakit kepala, atau kurang tidur. Masalah saluran napas (penyempitan bronkus) pada beberapa pasien asma.
20	Mengalami rasa lelah, kehilangan nafsu makan, sakit kepala, mudah tersinggung, daya ingat buruk, dan merasa pusing.
50–100	Mengalami konjungtivitis ringan (“mata gas”) dan iritasi saluran pernapasan setelah 1 jam. Dapat menyebabkan gangguan pencernaan dan kehilangan nafsu makan.

100	Batuk-batuk, iritasi mata, kehilangan penciuman setelah 2–15 menit (kelelahan penciuman). Perubahan ritme pernapasan, mengantuk setelah 1–30 menit. Iritasi tenggorokan setelah 1 jam. Peningkatan keparahan gejala secara bertahap selama beberapa jam. Kematian dapat terjadi setelah 48 jam.
100–150	Kehilangan daya penciuman (kelelahan penciuman atau kelumpuhan).
200–300	Konjungtivitis yang nyata dan iritasi saluran pernapasan setelah 1 jam. Edema paru dapat terjadi akibat paparan yang terlalu lama.
500–700	Limbung bahkan ambruk dalam 5 menit. Kerusakan serius pada mata dalam 30 menit dan dapat menyebabkan kematian dalam 30 –60 menit.
700–1000	Pingsan dalam 1–2 tarikan napas, henti napas, bahkan kematian dalam beberapa menit.
1000–2000	Kematian dalam waktu yang sangat cepat.

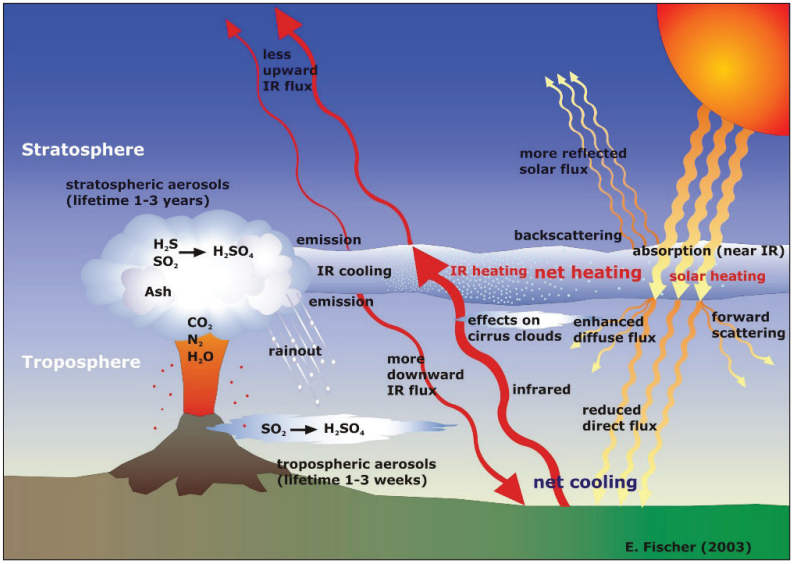
Catatan. Diadaptasi dari Occupational Safety and Health Administration (n.d.).

D. Dampak *Vog* Terhadap Lingkungan

Dampak utama *vog* terhadap lingkungan adalah menyebabkan hujan asam serta menghalangi sinar matahari mencapai permukaan bumi. Gunung Tambora yang meletus pada tahun 1815 dan menghasilkan debu vulkanis yang mencapai lapisan stratosfer telah menyebabkan terhalangnya sinar matahari mencapai permukaan bumi sehingga bumi menjadi gelap gulita cukup lama dalam kurun waktu satu tahun setelah letusan. Akibat erupsi tersebut, tahun 1816 dinyatakan sebagai *year without a summer* yang menyebabkan terjadinya bencana di banyak belahan dunia. Di dalam skala global, terjadi penurunan suhu sebesar 0,4–0,7°C (Stothers, 1984).

Sementara itu, letusan Gunung Pinatubo pada tahun 1991 telah menyebabkan pendinginan global sebesar 0,28°C selama 13 bulan sejak letusan (Boretti, 2024). Penurunan suhu bumi secara global menyebabkan bencana besar karena terjadinya perubahan iklim secara global. Kesulitan bahan pangan disebabkan banyaknya pertanian dan perkebunan yang gagal panen, serta hewan-hewan

ternak yang tidak dipersiapkan untuk menghadapi penurunan suhu lingkungan dalam jangka waktu yang lebih panjang dari biasanya.



Sumber: Fischer (2004)

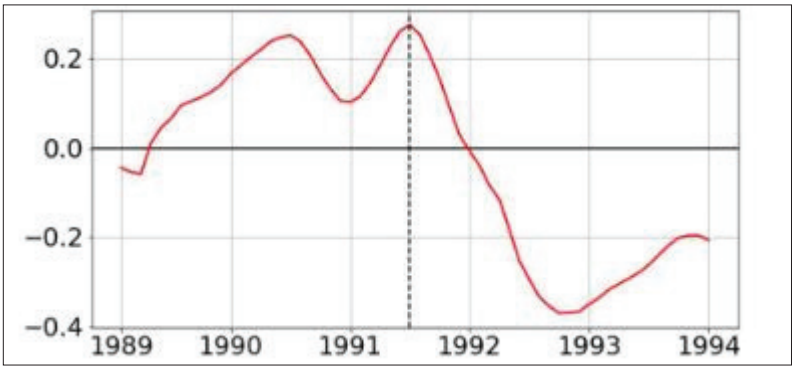
Gambar 4.5 Skenario erupsi gunung berapi memengaruhi iklim, dalam jangka panjang menimbulkan efek pendinginan global atau *global cooling*.

Setahun setelah terjadinya erupsi Gunung Krakatau, suhu rata-rata musim panas di belahan bumi utara turun sebesar 4°C (Bradley & Raymond, 1988). Erupsi Gunung Krakatau yang mendorong sejumlah besar gas SO_2 ke dalam lapisan stratosfer kemudian menyebar ke seantero bumi. Hal ini menyebabkan konsentrasi asam sulfat di dalam awan cirrus meningkat secara tajam yang berdampak pada meningkatnya albedo awan. Meningkatnya albedo awan berdampak pada lebih banyaknya energi matahari yang dipantulkan kembali ke luar angkasa sehingga menimbulkan gejala *global cooling*.

Setelah terjadinya erupsi vulkanis dahsyat antara tahun 1883 dan 1992, tercatat terjadinya pemanasan global di wilayah Eurasia

dan Amerika Utara. Sementara itu, di wilayah Timur Tengah dan Afrika utara terjadi pendinginan global (Robock & Mao, 1992).

Erupsi Gunung Pinatubo (1991) di Filipina memuntahkan sejumlah 15–19 Mt SO_2 ke atmosfer (Gerlach et al., 1996), jumlah ini jauh lebih banyak dibandingkan dengan 7 Mt SO_2 yang dilepaskan oleh erupsi Gunung El Chichón di Meksiko pada tahun 1982. Erupsi Gunung Pinatubo juga memberikan dampak penurunan suhu bumi, termasuk di wilayah Indonesia (benua maritim) sebesar 0,4°C pada kurun waktu satu tahun setelah terjadinya erupsi. Penurunan suhu dekat permukaan dapat dikaitkan dengan pengurangan anomali energi netto matahari pada periode yang diamati. Dampak anomali suhu bumi masih terasa hingga tiga tahun setelah erupsi Gunung Pinatubo.



Diadaptasi dari Salsabila et al. (2022)

Gambar 4.6 Deret waktu rata-rata anomali suhu udara dekat permukaan di wilayah benua maritim. Garis putus-putus vertikal adalah saat terjadinya erupsi Gunung Pinatubo.

Asam sulfat di dalam *vog* dapat terperangkap di dalam butiran-butiran awan, dan jika turun sebagai hujan dapat menyebabkan hujan asam. Hujan asam merupakan hujan yang memiliki pH kurang dari 5,6 dan bersifat asam dan korosif. Secara alami, hujan memiliki pH sedikit di bawah 6 karena senyawa karbon dioksida yang terlarut di dalam air hujan memiliki bentuk sebagai asam lemah. Namun

demikian, jenis asam ini berfungsi dalam membantu melarutkan mineral dalam tanah yang diperlukan oleh tumbuh-tumbuhan.

Adanya senyawa sulfur di udara akan mengotori air hujan dengan cara bereaksi dengan oksigen membentuk sulfur dioksida dan nitrogen oksida, kemudian membentuk asam sulfat dan asam nitrat dan jatuh bersama air hujan. Air hujan yang bersifat asam akan menyirami tanaman dan permukaan bumi, kemudian meresap ke dalam tanah, dan menimbulkan dampak yang tidak baik bagi lingkungan. Air hujan yang bersifat asam dapat mengikis jaringan pada tumbuhan sehingga mengurangi kemampuan tumbuhan dalam melakukan fotosintesis, tumbuhan mudah mengalami kekeringan, dan rentan terhadap hama penyakit dan serangga.

Setelah meresap ke dalam tanah, air hujan yang bersifat asam akan melarutkan nutrisi dan mineral yang bermanfaat bagi tumbuhan kemudian menyapunya sehingga tidak sempat diserap oleh tumbuhan. Di lingkungan perairan, misalnya danau dan rawa-rawa, air hujan yang bersifat asam dapat merusak insang ikan, menyebabkan embrio menjadi mati, bahkan menyebabkan ikan-ikan menjadi mandul (steril) karena sangat kekurangan kalsium. Akibatnya, ekosistem perairan menjadi terganggu.

Tabel 4.2 Perbandingan Erupsi Beberapa Gunung Berapi

Letusan	Tahun	Tinggi asap (km)	*Volcano Eruption Index*	Perubahan musim panas belahan bumi utara ºC
Tambora	1815	43	7	-0,5
Krakatau	1883	25	6	-0,3
Katmai	1912	32	6	-0,4
Pinatubo	1991	34	6	-0,5
Nevada del Ruiz	1985	27	3	Tidak terdapat perubahan

Catatan. Data diadaptasi dari Oppenheimer (2003) dan Global Volcanism Program (2024).

Vog atau kabut vulkanis yang terbentuk dari letusan gunung berapi merupakan percampuran antara abu vulkanis dan *smog*, dan

pada umumnya mengandung unsur sulfur atau belerang. Sulfur bersifat multivalensi dan dapat teroksidasi menjadi senyawa sulfat dan sulfit. Senyawa ini dapat mengiritasi kulit dan jaringan selaput lendir mata, tenggorokan, dan hidung sehingga menyebabkan gangguan pernapasan berupa batuk, sesak napas, bahkan asma. Dalam jangka waktu yang agak lama, *vog* yang masuk ke dalam tubuh juga menyebabkan sakit kepala dan kelelahan. Dalam paparan yang lebih lama lagi, *vog* berpotensi meningkatkan risiko penyakit pernapasan, risiko penyakit kardiovaskular, dan risiko kanker. Kelompok yang rentan terhadap paparan *vog* adalah bayi dan anak-anak, serta orang dewasa yang mengalami gangguan kesehatan.

Volcanic smog atau *vog* juga berpotensi merusak ekosistem, misalnya menyebabkan daun-daun tumbuhan menjadi seperti terbakar sehingga menghambat pertumbuhan bahkan menyebabkan kegagalan panen. Penurunan kesuburan tanah dapat juga dihubungkan dengan berubahnya komposisi tanah akibat tercemar oleh *vog*. Kandungan sulfur di dalam *vog* tentu saja akan berpengaruh terhadap pH air sehingga kehidupan akuatik menjadi terganggu. Dalam ruang lingkup yang lebih luas, *vog* juga dapat menyebabkan berubahnya pola cuaca yang selanjutnya akan berpengaruh terhadap keseimbangan ekosistem

Daftar Pustaka

Annisha, W. (2017). *Buku pintar mengenal bencana alam di Indonesia: Gunung meletus*. Erlangga.

Boretti, A. (2024). Reassessing the cooling that followed the 1991 volcanic eruption of Mt. Pinatubo. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *256*, Article 106187. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106187

Bradley, R. S. (1988). The explosive volcanic eruption signal in Northern Hemisphere continental temperature records. *Climatic Change*, 12(3), 221–243. https://doi.org/10.1007/BF00139431

Fandari, A. E., Daryanto, A., & Suprayitno, G. (2014). Pengembangan energi panas bumi yang berkelanjutan. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknika*, *17*(1), 68–82.

Fischer, E. (2004). *Volcanic forcing on European climate*. Institute for Atmospheric and Climate Science. http://iacweb.ethz.ch/staff/fischer/volcanic.html

Gangolli, S. (1999). *Kamus zat dan pengaruhnya* (2nd ed.). Masyarakat Kerajaan Kimia.

Geria, I. M. (2015). *Menyikap misteri terkuburnya peradaban Tambora*. Gajah Mada University Press.

Gerlach, T. M., Westrich, H. R., & Symonds, R. B. (1996). Preeruption vapor in magma of the climactic Mount Pinatubo eruption: Source of the giant stratospheric sulfur dioxide cloud. In C. G. Newhall & R. S. Punongbayan (Eds.), *Fire and mud: Eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines* (pp. 415–433). Philippine Institute of Volcanology and Seismology and University of Washington Press.

Global Volcanism Program. (2024). *Volcanoes of the world* (Venzke, E., Comp.; v. 5.1.5). Smithsonian Institution. https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW5-2024.5.1

Global Volcanism Program. (n.d.). *Mont Pelée*. Smithsonian Institution. https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=360050

Global Volcanism Program. (n.d.). *Tambora: Volcano photo collection*. Smithsonian Institution. https://volcano.si.edu/volcano.

Hakim, A. F., Krismadiana, Sholihah, F., Ismawati, R., & Dewantari, N. (2023). Potensi dan pemanfaatan energi panas bumi di Indonesia. *Indonesian Journal of Conservation*, 11(2), 71–77. https://doi.org/10.15294/ijc.v11i2.40599.

Indra, D. M. (2018). Perkembangan Gunung Agung, kebencanaan, dan persoalan pengungsi. *Jurnal Bali Membangun Bali*, 1(1). https://doi.org/10.51172/jbmb.v1i1.1

Lacroix, A. (1904). *La Montagne Pelée et ses éruptions*. Masson et Cie.

Lide, D. R. (Ed.). (2003). *CRC handbook of chemistry and physics* (84th ed.). CRC Press.

Mueller, W., Cowie, H., Horwell, C. J., Hurley, F., & Baxter, P. J. (2020). Health impact assessment of volcanic ash inhalation: A comparison with outdoor air pollution methods. *GeoHealth*, *4*, Article e2020GH000256. https://doi.org/10.1029/2020GH000256

Nurwahyudin, D. S., & Harmoko, U. (2020). Pemanfaatan dan arah kebijakan perencanaan energi panas bumi di Indonesia sebagai keberlanjutan maksimalisasi energi terbarukan. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, *1*(3), 111–123. https://doi.org/10.14710/jebt.2020.10032

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.). *Hazards*. Dalam *Hydrogen sulfide*. U.S. Department of Labor. https://www.osha.gov/hydrogen-sulfide/hazards

Oppenheimer, C. (2003). Climatic, environmental and human consequences of the largest known historic eruption: Tambora volcano (Indonesia) 1815. *Progress in Physical Geography*, *27*(2), 230–259. https://doi.org/10.1191/0309133303pp379ra

Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J.-C., & Borrero, C. A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1–4), 17–66.

Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. (2026). Peta sebaran gunung api aktif di Indonesia. *MAGMA Indonesia*, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. https://magma.esdm.go.id

Robock, A. (2000). Volcanic eruptions and climate. Reviews of Geophysics, 38(2), 191–219.

Robock, A., & Mao, J. (1992). Winter warming from large volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters*, *19*(24) [nomor issue tidak tercantum pada draf asli, diasumsikan issue 24 — mohon dikonfirmasi], 2405–2408.

Rosen, J. (2015, April 7). Benchmarks: May 8, 1902: The deadly eruption of Mount Pelée. *Earth Magazine*. https://www.earthmagazine.org/article/benchmarks-may-8-1902-deadly-eruption-mount-pelee

Salsabila, R., Suwarman, R., & Abdillah, M. (2022). Perubahan temperatur setelah letusan Pinatubo 1991 dari luaran model CMIP5. *Jurnal Sains Dirgantara*, 19(1), 55–64. https://doi.org/10.30536/j.jsd.2022.v19.a3557

Self, S., & Rampino, M. R. (1981). The 1883 eruption of Krakatau. *Nature*, 294(5843), 699–704. https://doi.org/10.1038/294699a0

Sigurdsson, H., Houghton, B. F., McNutt, S. R., Rymer, H., & Stix, J. (Eds.). (2015). *The encyclopedia of volcanoes* (2nd ed.). Academic Press.

Simkin, T., & Fiske, R. S. (1983). Krakatau 1883—The volcanic eruption and its effects. Smithsonian Institution Press.

Sparks, R. S. J., Self, S., Grattan, J. P., Oppenheimer, C., Pyle, D. M., & Rymer, H. (2005). Super-eruptions: Global effects and future threats (2nd ed.). *The Geological Society of London*. https://www.geolsoc.org.uk/supereruptions

Stothers, R. B. (1984). The great Tambora eruption in 1815 and its aftermath. *Science*, *224*(4654), 1191–1198.

U.S. Geological Survey, Communications and Publishing. (2016, December 8). *Map of volcanoes in Indonesia* [Map]. https://www.usgs.gov/media/images/map-volcanoes-indonesia

Wellburn, A. R. (1994). Air pollution and climate change: The biological impact (2nd ed.). Longman Scientific & Technical.

Yamamoto, T., Takarada, S., & Suto, S. (1993). Pyroclastic flows from the 1991 eruption of Unzen volcano, Japan. *Bulletin of Volcanology*, 55(3), 166175. https://doi.org/10.1007/BF00301514

.

Bab V
Kualitas Udara dalam Ruang: Analisis, Evaluasi, dan Upaya Mitigasi

Indra Chandra

A. Pentingnya Pemahaman Terhadap Kualitas Udara Dalam Ruang

Kualitas udara dalam ruang merupakan salah satu aspek penting dalam kesehatan lingkungan yang sering kali terabaikan. Meskipun kita lebih sering mendengar tentang polusi udara ambien, kenyataannya adalah manusia menghabiskan sebagian besar waktunya di dalam ruangan.

Beberapa faktor penyebab buruknya kualitas udara dalam ruang meliputi material bangunan (seperti bahan kimia bangunan),

I. Chandra
Universitas Telkom, *e-mail*: indrachandra@telkomuniversity.ac.id

© 2026 Editor & Penulis

Chandra, I. (2026). Kualitas Udara Dalam Ruang:Analisis, Evaluasi, dan Upaya Mitigasi. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (75–100). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1809
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

aktivitas manusia (seperti memasak dan membersihkan rumah), serta masuknya polutan dari luar ruangan (Mfarrej et al., 2020; Notman, 2020; Saad et al., 2017). Sumber emisi tersebut meningkatkan konsentrasi gas dan partikel berbahaya di udara yang dapat berimplikasi pada kesehatan penghuninya (Mfarrej et al., 2020; Saad et al., 2017). Selain itu, kondisi lingkungan seperti temperatur, kelembapan, dan ventilasi juga dapat memengaruhi kualitas udara dalam ruang.

Lebih jauh, kegiatan memasak atau penggunaan pemanas ruangan dapat menghasilkan nitrogen oksida ($NO_x \approx NO + NO_2$) (Kumie et al., 2009). Senyawa *volatile organic compound* (VOC) seperti formaldehida dapat berasal dari interior bangunan (Harčárová, 2020). Keberadaan NO_x dan VOC tersebut bersama oksigen (O_2) jika terpapar sinar matahari dapat membentuk ozon (O_3) (Lazaridis dan Aleksandropoulou, 2009), yang sama berbahayanya terhadap kesehatan manusia. Di sisi lain, pembakaran arang dan kayu dapat menghasilkan sulfur dioksida (SO_2) (Seow et al., 2015). Selain itu, proses pembakaran yang tidak sempurna dapat menghasilkan konsentrasi massa partikulat dengan berbagai ukuran (Isaxon et al., 2015; Morawska et al., 2017).

Logam berat yang berasal dari berbagai kegiatan di dalam ruang, seperti pembakaran rokok (Cd, Pb, atau Cr), penyolderan di laboratorium (Pb, Cu, atau Zn), atau produk kosmetik (Pb, Cd, atau Hg), dan/atau infiltrasi udara luar juga dapat ditemukan (Hashemi et al., 2020; Jha et al., 2020). Logam berat tersebut dapat bersifat karsinogenik, contohnya arsenik, kadmium, dan timbal, yang merupakan beberapa penyebab kanker. Logam berat non-karsinogenik seperti kromium, kobalt, dan aluminium, apabila terpapar dalam jumlah yang cukup besar dan jangka waktu yang lama dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan. Sejalan dengan itu, gas radioaktif seperti radon umumnya ditemukan di dalam ruangan karena berasal dari tanah, batuan, atau air tanah yang mengandung unsur uranium dan torium. Gas ini merupakan hasil peluruhan alami unsur radioaktif tersebut dan dapat masuk ke dalam bangunan melalui retakan pada dinding, celah fondasi,

saluran pipa, maupun pori-pori material bangunan (Lugg & Probert, 1997).

Selain sumber polusi dalam bentuk gas dan partikulat, mikroorganisme juga dapat menimbulkan masalah kesehatan. Mikroorganisme seperti bakteri, virus, dan jamur yang berasal dari manusia, hewan peliharaan, tanaman, saluran air, pendingin ruangan, dan/atau ventilasi, disebut juga sebagai bioaerosol karena pola penyebarannya melalui udara atau menempel pada partikulat yang kemudian menyebar di dalam ruangan (Srikant et al., 2008).

Studi yang dilakukan Mousavi et al. (2019) dan Andhikari et al. (2006) menunjukkan bahwa parameter temperatur, kelembapan, dan ventilasi dapat meningkatkan secara signifikan terhadap konsentrasi bioaerosol dan jenis polutan lainnya. Sirkulasi udara yang baik melalui ventilasi yang tepat dapat meminimalisasi kemungkinan buruknya kualitas udara dalam ruang.

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, paparan terhadap berbagai polutan dalam ruang dapat menyebabkan masalah kesehatan, mulai dari iritasi mata, hidung, dan tenggorokan, hingga kondisi yang lebih serius seperti penyakit jantung dan paru-paru. Beberapa polutan dalam ruang bahkan telah terbukti bersifat karsinogenik, seperti gas radon yang berasal dari tanah dan batuan di bawah bangunan, senyawa organik volatil (VOC) (misalnya formaldehida dan benzena) dari cat, perekat, serta furnitur kayu olahan, dan partikulat halus ($PM_{2.5}$) yang membawa senyawa berbahaya seperti logam berat dan hidrokarbon aromatik polisiklik.

Paparan jangka panjang terhadap zat-zat ini dapat meningkatkan risiko kanker paru, nasofaring, maupun leukemia, terutama apabila ventilasi ruangan buruk dan sumber emisi tidak terkendali. Namun, meskipun kualitas udara dalam ruang diakui penting, masih banyak yang perlu diketahui tentang dampaknya terhadap kesehatan manusia (Velichkova et al., 2019). Misalnya, kita perlu lebih memahami bagaimana polutan udara dalam ruangan berinteraksi satu sama lain serta bagaimana polutan udara memengaruhi kesehatan manusia dalam jangka panjang (Vardoulakis et al., 2020). Kita juga perlu

lebih memahami bagaimana faktor-faktor seperti ventilasi dan kelembapan memengaruhi konsentrasi polutan udara dalam ruang.

Dengan makin berkembangnya sains dan teknologi, pengembangan sensor dan kinerjanya merupakan langkah penting dalam memantau polutan udara dan kondisi iklim mikro. Perangkat tersebut diharapkan dapat membantu dalam pemahaman kondisi kualitas udara dan iklim mikro, terutama di dalam ruangan.

Teknologi *Internet of Things* (IoT) telah dimanfaatkan di berbagai negara untuk pemantauan kualitas udara dalam ruang secara *real-time*, sehingga memungkinkan pengumpulan data berkelanjutan mengenai konsentrasi polutan dan kondisi iklim mikro di lingkungan tertutup. Sementara itu, penggunaan *Artificial Intelligence* (AI) dapat mengakselerasi interpretasi data dan prediksi paparan polutan serta dampak jangka pendek dan panjang terhadap kesehatan manusia (Mani et al., 2021; Saini et al., 2021).

Penerapan langsung di antaranya telah dilakukan Kitchilan et al. (2022) dengan mengembangkan perangkat berbasis IoT yang hemat biaya dan pemanfaatan AI untuk prediksi dalam penilaian kualitas udara. Rajasekar et al. (2020) menambahkan kemampuan prediksi penyakit dari pengukuran berbasis IoT.

Penelitian secara komprehensif tentang kualitas udara dalam ruang sangat dibutuhkan. Diperlukan pemantauan dan metode bagaimana agar kualitas udara dalam ruang dapat dijaga dengan baik, terutama di lingkungan publik seperti fasilitas kesehatan dan pendidikan, dalam upaya menjaga kesehatan penghuninya (Śmiełowska et al., 2017). Hal tersebut memerlukan upaya kolaboratif dalam mengembangkan strategi yang lebih efisien untuk mengurangi paparan terhadap polutan udara dalam ruang. Pemahaman yang lebih mendalam mengenai sumber polutan akan memberikan landasan bagi implementasi langkah-langkah preventif.

Ruangan pada fasilitas publik memerlukan kebijakan yang bersifat proaktif untuk menjaga kebersihan udara. Dengan demikian, kebijakan tersebut tidak hanya perlu melibatkan para pihak, tetapi juga perlu mendukung penelitian terus-menerus dalam

meningkatkan pemahaman dan tindakan untuk menjaga kualitas udara di ruang-ruang vital ini.

B. Baku Mutu Dan Kebijakan Kualitas Udara Dalam Ruang

Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) memperkirakan bahwa setiap tahunnya terdapat sekitar 3,8 juta kematian yang disebabkan oleh polusi udara dalam ruang di seluruh dunia, terutama di negara berkembang (Balmes, 2019). Pembakaran bahan bakar padat organik untuk keperluan memasak atau pemanas memiliki mekanisme pembakaran yang serupa dengan pembakaran tembakau, yaitu sama-sama menghasilkan konsentrasi partikulat dan gas.

Berdasarkan panduan WHO, terdapat senyawa organik seperti hidrokarbon aromatik (*benzene*, *naphthalene*, dan *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAHs)) dan klorokarbon (*trichloroethylene*, *tetrachloroethylene*), atau senyawa organik yang mudah menguap (VOC) seperti formaldehida (WHO, 2010). Selain itu, konsentrasi karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO_2), dan radon, merupakan sumber emisi lainnya di dalam ruang. Secara khusus, WHO (2014) memberikan panduan normatif mengenai batas paparan polutan hasil pembakaran di rumah, termasuk nilai ambang untuk partikulat halus ($PM_{2.5}$), karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO_2), dan senyawa organik volatil (VOC) seperti formaldehida. Panduan tersebut juga menekankan pentingnya penggunaan bahan bakar bersih serta sistem ventilasi yang memadai untuk mencegah akumulasi polutan berbahaya di dalam ruang.

Baku mutu kualitas udara dalam ruang ditetapkan untuk melindungi kesehatan manusia dari dampak negatif polutan udara terhadap organ vital tubuh. Beberapa polutan utama memiliki batas ambang paparan tertentu yang apabila terlampaui dapat meningkatkan risiko gangguan pada sistem pernapasan, darah, atau organ lain, sebagaimana dirangkum pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Baku Mutu dan Risiko Kesehatan Beberapa Polutan Udara dalam Ruang

Polutan	Konsentrasi / Batas Paparan	Risiko / Efek Kesehatan Utama	Organ/Sistem Tubuh yang Terdampak
Benzena	17 µg/m³	Risiko 1:10.000 gangguan darah dan leukemia	Sumsum tulang, sistem hematopoietik
PAHs (Benzo[a] pyrene)	1,2 ng/m³	Risiko 1:10.000 kanker paru/hati	Paru, hati
Klorokarbon (*trichloroethylene, tetrachloroethylene*)	230 µg/m³	Risiko 1:10.000 kanker hati/paru-paru	Hati, paru
Formaldehida (VOC)	>0,1 mg/m³ (rerata 30 menit)	Iritasi mata, hidung, tenggorokan	Saluran pernapasan atas
Karbon monoksida (CO)	≤35 mg/m³ (1 jam)	Gangguan transpor oksigen, hipoksia	Otak, jantung
Nitrogen dioksida (NO_2)	≤200 µg/m³ (1 jam)	Peradangan saluran napas, asma	Paru, bronkus
Radon (Rn-222)	67 Bq/m³	Risiko kanker paru 1:100	Paru-paru

Sumber: WHO (2009; 2010; 2014)

Sementara itu, WHO juga mengeluarkan panduan kualitas udara secara global, mencakup partikulat ($PM_{2.5}$ dan PM_{10}), O_3, NO_2, SO_2, dan CO (WHO, 2021). Terdapat target akhir dan target sementara (interim) yang dikeluarkan oleh WHO. Rekomendasi jangka pendek (rerata 24 jam) dan panjang (1 tahun) untuk setiap polutan adalah sebagai berikut: $PM_{2.5}$ sebesar 15 µg/m³ (jangka pendek) dan 5 µg/m³ (jangka panjang); PM_{10} sebesar 45 µg/m³ dan 15 µg/m³; serta NO_2 sebesar 25 µg/m³ dan 10 µg/m³. CO dan SO_2 rerata konsentrasi per harinya adalah masing-masing 4 mg/m³ dan 40 µg/m³, sedangkan O_3 berdasarkan rerata per 8 jam, yaitu 100 µg/m³. Perubahan level konsentrasi tersebut merefleksikan adanya bukti empiris pada paparan konsentrasi rendah terhadap kesehatan manusia dan diharapkan dapat memengaruhi kebijakan kualitas udara di seluruh dunia untuk ke depannya (Hoffmann et al., 2021).

Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (USEPA) bekerja sama dengan WHO dalam mengatasi dampak kesehatan

lingkungan, baik di dalam maupun luar ruangan, termasuk upaya pengurangan emisi polutan, peningkatan kesadaran lingkungan, serta penanganan polusi lintas batas di negara-negara berpenghasilan rendah dan menengah. USEPA menetapkan standar nasional kualitas udara ambien yang mencakup enam polutan utama, yaitu karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO_2), sulfur dioksida (SO_2), ozon (O_3), partikulat (PM), dan timbal (Pb) (USEPA, 2023). Meskipun standar ini diterapkan untuk udara luar ruangan karena dampaknya yang signifikan terhadap kesehatan masyarakat dan lingkungan, kriteria tersebut tetap relevan untuk dijadikan acuan dalam penilaian kualitas udara dalam ruang.

Di Indonesia, pengaturan kualitas udara dalam ruang telah ditetapkan melalui Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023, yang merupakan pelaksanaan dari Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan. Regulasi ini mencakup penetapan parameter dan ambang batas kualitas udara dalam ruang untuk melindungi kesehatan masyarakat, menggantikan dan memperbarui ketentuan sebelumnya yang tertuang dalam Keputusan Menteri Kesehatan Nomor 829 Tahun 1999 tentang Persyaratan Kesehatan Perumahan dan Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 1077 Tahun 2011 tentang Pedoman Penyehatan Udara dalam Ruang Rumah.

Hal ini diperkuat oleh pemerintah dengan memasukkan isu kualitas udara dan perubahan iklim ke dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2025–2029, sebagai bagian dari agenda prioritas pembangunan berkelanjutan dan ketahanan lingkungan. Namun, penerapan di lapangan masih memerlukan strategi operasional dan intervensi lintas sektor agar tidak bersifat *business as usual*. WHO juga mendukung Pemerintah Indonesia, melalui Kementerian Kesehatan (Kemenkes), untuk meninjau kembali kebijakan, rencana implementasi, serta peraturan relevan dari berbagai Kementerian dan Lembaga guna memperkuat upaya pengendalian polusi udara dan mitigasi dampak kesehatan akibat perubahan iklim.

Dalam upayanya tersebut, Kemenkes mengeluarkan naskah "*Peta Jalan Kualitas Udara Dalam Ruang 2022–2030*" sebagai acuan bagi pemerintah dan pihak terkait dalam merencanakan, menyusun, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi kebijakan dan strategi terkait kualitas udara dalam ruang. Peta jalan mencakup perencanaan untuk pengelolaan dan pengawasan aspek kesehatan dalam kualitas udara dalam ruang di area perumahan dan tempat umum. Hal ini berfokus pada enam isu prioritas: (1) pengembangan kebijakan, (2) pengawasan, (3) pengembangan sistem pendukung pengelolaan, (4) pengembangan kapasitas sumber daya manusia, (5) pemberdayaan masyarakat dan penguatan institusi, dan (6) pemanfaatan kajian dan perkembangan teknologi terkait kualitas udara dalam ruang.

Target periodik peta jalan pengelolaan kualitas udara dalam ruang di lingkungan permukiman, tempat kerja, tempat rekreasi, serta tempat dan fasilitas umum (termasuk fasilitas pelayanan kesehatan) diselaraskan dengan arah kebijakan RPJMN 2025–2029, yang menempatkan pembangunan kesehatan lingkungan dan pengendalian risiko pencemaran udara sebagai bagian dari agenda prioritas peningkatan kualitas hidup manusia dan ketahanan iklim. Peta jalan tersebut terbagi menjadi tiga tonggak utama, yaitu Periode I (2025–2026) *"Penguatan komitmen dan koordinasi lintas sektor dalam pengelolaan kualitas udara dalam ruang"*; Periode II (2027–2028) *"Pengembangan kapasitas sumber daya manusia, sistem, dan infrastruktur pemantauan kualitas udara dalam ruang"*; serta Periode III (2029–2030) *"Tercapainya implementasi pengelolaan kualitas udara dalam ruang yang bersih, sehat, dan berkelanjutan."*

Dalam dokumen tersebut, polutan dikelompokkan ke dalam lima kelompok besar, yaitu bahan kimia anorganik (CO_2, CO, NO_2, SO_2, O_3, radon), bahan kimia organik (formaldehida, PAHs, VOC), polutan biologis (alergen, fungi, mikroorganisme, serbuk sari), partikulat (PM1, $PM_{2.5}$, PM_{10}), dan lainnya (*asbestos*, pestisida). Menurut Permenkes No. 1077 tahun 2011, persyaratan kualitas udara dalam ruang rumah terdiri atas kualitas fisik (partikulat, temperatur, kelembapan, pencahayaan, dan laju udara bersih), kualitas kimia

(berbagai jenis polutan), serta kualitas biologi (seperti bakteri dan jamur) di lingkungan permukiman, tempat kerja, tempat rekreasi, serta tempat umum (sekolah, fasilitas pelayanan kesehatan, pasar rakyat, prasarana transportasi).

Tentu saja, ada beberapa catatan terkait implementasi kebijakan yang perlu diperhatikan oleh pemerintah. Diperlukan fokus pada mekanisme pemantauan dan evaluasi yang kuat untuk memastikan bahwa kebijakan dan strategi yang diterapkan benar-benar efektif dalam meningkatkan kualitas udara dalam ruangan. Mengingat bahwa isu kualitas udara dalam ruang melibatkan berbagai sektor, perlu ada upaya lebih lanjut untuk memperkuat kolaborasi. Hal ini dapat mencakup kerja sama antara berbagai kementerian, lembaga pemerintah, organisasi masyarakat sipil, dan kelompok masyarakat. Untuk mencapai tujuan jangka panjang, diperlukan pula langkah tambahan untuk meningkatkan pendidikan dan kesadaran masyarakat tentang pentingnya kualitas udara dalam ruang dan bagaimana mereka dapat berkontribusi dalam upaya-upaya tersebut.

C. Teknik Pengukuran dan Analisis Kualitas Udara Dalam Ruang

Pemantauan polutan dalam ruang merupakan aspek penting dalam pengelolaan kualitas udara. Ada berbagai metode dan teknik yang dapat digunakan untuk mengukur dan menganalisis kualitas udara dalam ruang, mulai dari instrumen mahal dengan metode referensi hingga sensor mikro berbiaya murah.

Instrumen berstandar referensi biasa digunakan dalam pemantauan dan pengukuran kualitas udara karena memiliki tingkat akurasi dan keandalan yang tinggi. Teknologi seperti spektrometri massa atau analisis kromatografi gas dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan mengukur konsentrasi polutan udara dalam ruang dengan resolusi yang sangat tinggi. Instrumen-instrumen ini memungkinkan *stakeholder* terkait untuk mendeteksi konsentrasi polutan yang mungkin tidak dapat dideteksi oleh metode lain dengan tingkat presisi yang sangat tinggi.

Namun demikian, perangkat standar juga memiliki tantangan dalam hal biaya yang mahal dan memerlukan pelatihan khusus sebelum dan selama digunakan. Beberapa perangkat menggunakan metode pengambilan sampel udara dan dianalisis di laboratorium, yang dapat memakan waktu dan sumber daya. Peralatan lainnya dapat mengukur secara *real-time*, namun selain mahal, juga memerlukan perawatan khusus, dan terkadang harus dikirim kembali ke vendornya dengan biaya yang cukup tinggi. Sebagai alternatifnya, mikrosensor dapat digunakan untuk memantau kualitas udara dalam ruang. Sensor-sensor ini biasanya lebih mudah digunakan dan lebih terjangkau daripada instrumen standar, dan menjadi pilihan yang baik untuk penelitian yang bersifat indikatif atau untuk aplikasi ketika biaya menjadi pertimbangan utama.

Mikrosensor dapat digunakan untuk mengukur berbagai polutan udara dalam ruang, termasuk partikel, gas, dan mikroorganisme. Selain itu, dapat digunakan untuk memantau kondisi lingkungan seperti temperatur, kelembapan, dan intensitas cahaya, yang dapat memengaruhi kualitas udara dalam ruang.

Mikrosensor memiliki beberapa keterbatasan, dan tidak seakurat atau seandal instrumen standar. Perangkat ini lebih rentan terhadap gangguan dari faktor-faktor lingkungan dan memerlukan kalibrasi secara teratur untuk memastikan hasil yang akurat. Walaupun demikian, dengan berbagai peningkatan kinerja sensor dan sistem pendukung lainnya, perangkat berbasis mikrosensor dapat digunakan untuk memantau kualitas udara di dalam ruang. Villa-López et al. (2017) mengukur VOC menggunakan resonator dengan mendiferensiasi konsentrasi di lingkungan terhadap nilai referensinya. Perubahan massa akibat penyerapan molekul VOC di dalam lapisan polimer akan menyebabkan pergeseran frekuensi resonator. Biasanya, sensor ini memiliki sensitivitas yang cukup tinggi untuk mendeteksi satu atau lebih senyawa VOC.

Teknologi lainnya berbasis semikonduktor menggunakan material nano oksida seng (ZnO) pada elektroda platinum (Pt) untuk mengukur berbagai konsentrasi gas seperti *benzene*, formaldehida,

dan NO_2 (Gonzalez-Chavarri et al., 2014). Aplikasi berbasis *Metal-Oxide Semiconductor* (MOS) untuk pengukuran konsentrasi gas (ekuivalen CO_2, total VOC (TVOC)) dan aplikasi berbasis optik untuk konsentrasi massa partikulat ($PM_{2.5}$, PM_{10}) telah dilakukan oleh Palomeque-Mangut et al. (2021).

Material dengan struktur nano seperti 0D (*nanoparticle*), 1D (*nanotube*), 2D (lapisan atom tunggal), dan 3D (struktur berpori) yang bersifat resistif telah dikembangkan dan diaplikasikan untuk pemantauan berbagai polutan di dalam dan luar ruangan (Santos et al., 2020). Penggunaan mikrosensor dengan teknologi elektrokimia juga dapat mendeteksi toksisitas udara melalui pemantauan konsentrasi CO, hidrogen sulfida (H_2S), NO, NO_2, O_3, dan SO_2 (Spyropoulos et al., 2021).

Chandra et al. (2021a) lebih lanjut menjelaskan penggunaan mikrosensor yang telah digunakan secara luas dalam berbagai lingkungan, mulai dari area perkotaan dan berpolusi hingga area bersih seperti pedesaan, serta dari stasiun ukur pada ketinggian rendah sampai tinggi. Mikrosensor ini memungkinkan pemantauan kualitas udara secara *real-time* dan *online* dengan resolusi spasial dan temporal yang tinggi.

Beberapa metode kalibrasi sensor di laboratorium untuk deteksi konsentrasi gas dan partikulat perlu dilakukan sebelum dipasang di lapangan. Kolokasi berupa tandem mikrosensor dengan alat utama di lingkungan yang sebenarnya perlu diuji terlebih dahulu. Hasil yang didapat berupa kesesuaian data yang tinggi untuk sensor partikulat. Sementara itu, sensor gas dengan sensitivitas rendah masih dapat mendeteksi fluktuasi konsentrasi gas di udara. Perlu dicatat bahwa data kualitas udara dari mikrosensor bukan merupakan data yang dapat digunakan untuk regulasi saat ini, tetapi bersifat indikatif. Oleh karena itu, persiapan jalur pengambilan sampel yang baik, ruang pengukuran yang sesuai, serta penghindaran emisi langsung atau kondisi lembap, akan menjaga validitas dan kualitas udara.

Penggabungan dan perkembangan teknologi IoT dan AI, atau disebut sebagai *Artificial Intelligence of Things* (AIoT), dalam

pemantauan kualitas udara dalam ruang kian mempertajam proses deteksi polutan dalam memberikan peringatan dini ataupun mitigasi ke depannya. Yang et al. (2021) menjelaskan bahwa penggunaan mikrosensor partikulat secara masif, penanganan data berskala besar, serta penerapan AI langsung di sensor yang terhubung ke IoT memungkinkan analisis data dilakukan secara *real-time*. Dengan analisis data yang dilakukan secara *real-time*, pengambilan keputusan dapat dilakukan secara cepat karena data tidak perlu dikirimkan terlebih dahulu ke *cloud* atau pusat data untuk pemrosesan. Integrasi AIoT dalam asesmen kualitas udara dalam ruang memungkinkan berbagai permasalahan dilihat secara bersamaan dalam satu kerangka kerja yang terpadu, yakni penghuni dan aktivitas yang dilakukan, sumber emisi dalam dan luar ruangan, struktur dan tata letak ruangan/bangunan, serta teknologi untuk pemantauan dan pengendalian polutan di dalam ruangan (Saini et al., 2022).

Lembaga profesional *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) mengeluarkan panduan nomor 42-2023 terkait upaya untuk meningkatkan kualitas udara dalam ruangan di bangunan komersial dan institusi. Aspek yang dikaji meliputi identifikasi sumber polutan dalam ruang, sistem ventilasi, teknologi pemantauan dan pengendalian kualitas udara dalam ruang, edukasi dan pelatihan, serta evaluasi secara berkelanjutan. Sementara itu, organisasi internasional untuk standardisasi (*International Organization for Standardization,* disingkat *ISO*) mengeluarkan beberapa dokumen standar, yaitu ISO 16000 terkait formaldehida dan VOC, ISO 17772 terkait evaluasi paparan manusia terhadap polutan di dalam ruang dan metode penilaiannya, serta ISO 16814 terkait teknik perhitungan dan pengukuran untuk mengevaluasi kinerja sistem pengendalian udara dalam bangunan. Ketiga dokumen tersebut, setidaknya, membantu mengarahkan lebih lanjut bagaimana teknik pengukuran dan analisis kualitas udara dalam ruang dapat dilakukan oleh para pemangku kepentingan.

Setelah data tentang kualitas udara dalam ruang telah dikumpulkan, langkah selanjutnya adalah menganalisis dan

memahami data tersebut. Salah satu cara untuk melakukan ini adalah melalui visualisasi data. Visualisasi data melibatkan penggunaan teknik grafis untuk mewakili data, membuatnya lebih mudah untuk dipahami dan dianalisis. Misalnya, peta panas (*heat map*) dengan pengklasifikasian berdasarkan warna dapat digunakan untuk mewakili konsentrasi polutan udara dalam ruang (Jalasena et al., 2023). Selain itu, teknik seperti *Kriging* (Putri et al., 2022; Jung et al., 2023) dan pendekatan AI (Sundari et al., 2023; Kapoor et al., 2023; Kalamaras et al., 2019) dapat digunakan untuk menganalisis dan memvisualisasikan data kualitas udara dalam ruang. Teknik-teknik ini dapat membantu peneliti untuk mengidentifikasi pola dan tren dalam data, membuat prediksi, dan mengembangkan strategi yang lebih efektif tentang pengelolaan kualitas udara dalam ruang di masa depan.

D. Studi Kasus Asesmen Kualitas Udara dalam Ruang di Lingkungan Yayasan Pendidikan Telkom

Kualitas udara dalam ruang di lingkungan pendidikan, seperti sekolah dan perguruan tinggi, memegang peranan penting dalam kesehatan dan kinerja akademik. Sebagai contoh, di Yayasan Pendidikan Telkom (YPT), aktivitas sehari-hari seperti tingkat okupansi (jumlah pelajar), kegiatan belajar-mengajar, dan praktikum, dapat memengaruhi kualitas udara dalam ruang. Peningkatan konsentrasi CO_2, terutama saat sirkulasi udara atau ventilasi tidak memadai, dapat terjadi akibat aktivitas tersebut. Selain itu, kegiatan seperti eksperimen sains dan teknologi serta memasak juga dapat melepaskan polutan ke udara. Untuk mengevaluasi kualitas udara dalam ruang, berbagai teknik pengukuran dan analisis dapat digunakan, termasuk penggunaan mikrosensor untuk pemantauan *real-time*. Hasil penilaian dapat memberikan wawasan tentang sumber polutan dan karakteristik kualitas udara dalam ruang, yang penting untuk pengembangan strategi mitigasi.

Penelitian yang dilakukan oleh Shidki et al. (2020) di empat tipe ruang perkantoran di Universitas Telkom mengidentifikasi

paparan konsentrasi $PM_{2.5}$ dan CO_2 yang melebihi baku mutu kualitas udara dalam ruang selama jam kerja. Tingginya konsentrasi CO_2 tidak sebanding dengan laju udara bersih yang tersedia, yang menunjukkan adanya pertukaran udara yang tidak memadai dan ventilasi yang buruk. Kondisi seperti ini memicu pertumbuhan berbagai jenis bakteri, termasuk *staphylococcus*, *streptococcus*, dan *enterobacteriaceae*.

Ruangan dengan tingkat okupansi tinggi cenderung memiliki jumlah mikroorganisme yang lebih tinggi. Parameter non-biologi diukur dengan menggunakan mikrosensor $PM_{2.5}$ (SKU:SEN0177, DFRobot), CO_2 (SKU:SEN0219, DFRobot), serta temperatur udara dan kelembapan relatif (DHT22). Sementara itu, pengukuran pasif sampel mikroorganisme menggunakan media kultivasi berupa Trypticase Soy Agar (TSA), MacConkey Agar (MCA), Mannitol Salt Agar (MSA), dan Sabouraud Dextrose Agar (SDA). Perbedaan media kultivasi tersebut bertujuan untuk mendeteksi berbagai jenis bakteri yang dapat ditemukan di lingkungan kampus.

Di ruangan lain di Universitas Telkom, yang memiliki ketinggian yang berbeda, ditemukan rerata konsentrasi bioaerosol sebesar 1200–6000 CFU/m^3 (Firdaus et al., 2020). Satuan CFU/m^3 mengindikasikan jumlah koloni mikroorganisme per volume udara. Kurangnya sirkulasi udara memfasilitasi pertumbuhan mikroorganisme di titik-titik tertentu dengan tingkat kelembapan yang tinggi.

Jenis aktivitas yang dilakukan oleh penghuni ruangan juga memperburuk situasi ini. Beberapa jenis bakteri yang teridentifikasi antara lain *enterobacteriaceae*, *bacillus*, *streptococcus*, *enterococcus*, dan *staphylococcus*. Untuk pengukuran, digunakan alat pengambil sampel aktif dengan metode impaktor (BioStage Single Stage, SKC Inc.) dengan laju alir udara 28,3 L/menit pada ketinggian 1,5 meter di atas lantai (Shania et al., 2021). Secara terpisah, paparan bioaerosol secara personal cenderung lebih tinggi di lokasi-lokasi dengan aktivitas seperti pembakaran sampah secara terbuka (Nafisah et al., 2021).

Dalam analisis kualitas udara dalam praktikum Fisika Dasar dan Algoritma Pemrograman di Universitas Telkom yang dilakukan oleh Tahsiin et al. (2020), ditemukan bahwa konsentrasi polutan di dalam ruangan dipengaruhi oleh infiltrasi udara luar ruangan, tingkat okupansi, dan laju ventilasi. Penggunaan *Air Conditioning* (AC) dalam ruangan mampu menjaga konsentrasi CO_2 pada level < 1000 ppm selama 8 jam. Namun demikian, konsentrasi tersebut meningkat melebihi baku mutu ketika sejumlah praktikan melakukan kegiatan praktikum. Sementara itu, konsentrasi massa $PM_{2.5}$ cenderung mengikuti kualitas udara luar, terlepas dari keberadaan penghuni di dalam ruangan. Sebagai upaya intervensi, penelitian menunjukkan bahwa memasukkan tanaman jenis *dieffenbachia* sp. dalam 10 pot dapat meningkatkan konsentrasi O_2 dan menurunkan konsentrasi CO_2. Strategi ini terbukti efektif ketika tanaman tersebut mendapatkan intensitas cahaya matahari yang cukup.

Secara terpisah, dilakukan pengukuran kualitas udara dalam ruangan di *Telkom School*, yaitu SMP, SMA, SMK, dan SMK Pariwisata Telkom Bandung (Jalasena et al., 2023). Tahapan pekerjaan mencakup *profiling*, pemantauan, survei, dan analisis pada empat tipe ruangan di setiap sekolah tersebut, mulai dari ruangan dengan okupansi dan aktivitas tinggi hingga ruangan yang jarang digunakan. Rerata konsentrasi CO_2 dan $PM_{2.5}$ di beberapa ruangan cukup tinggi dan melebihi standar baku mutu udara dalam ruangan, kecuali untuk ruangan yang jarang digunakan yang mengikuti konsentrasi udara ambien. Detektor gas karbon monoksida (CO; SKU:SEN0132, DFRobot) mendeteksi tingginya konsentrasi gas tersebut (> 9 ppm) karena adanya aktivitas kelas memasak. Hasil tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil *profiling* dan survei, yang menunjukkan bahwa jumlah penghuni dan jenis aktivitas, penggunaan AC, dan jumlah ventilasi berpengaruh pada hasil pengukuran tersebut.

Dari beragam penelitian yang dilakukan, salah satu aspek yang memengaruhi kualitas udara dalam ruangan adalah kondisi udara ambien. Oleh karena itu, penting bagi tempat hunian dan perkantoran untuk memiliki ruang terbuka hijau, terutama dengan

tutupan vegetasi yang memadai (Diener & Mudu, 2021). Hal ini bertujuan untuk mengurangi dampak buruk udara luar yang dapat langsung memengaruhi kualitas udara di dalam ruangan. Sebagai contoh, Universitas Telkom Kampus Bandung memiliki luas total 49 hektar, dengan kawasan hijau sekitar 11,5 hektar di dalamnya. Luasnya kawasan hijau ini memberikan kesempatan untuk penyerapan polutan dan memberikan pasokan konsentrasi O_2 yang cukup bagi seluruh sivitas akademika. Penelitian yang dilakukan oleh Rahmadani et al. (2021) menggunakan detektor portabel yang dapat mengukur konsentrasi $PM_{2.5}$, CO_2, dan O_3. Hasil pengukuran menunjukkan konsentrasi massa $PM_{2.5}$ berada dalam kisaran 5–25 $\mu g/m^3$, konsentrasi CO_2 di bawah 520 ppm, dan konsentrasi O_3 di bawah 150 ppb. Namun, penting untuk dicatat bahwa pengukuran dilakukan selama masa pembatasan sosial berskala besar yang dilakukan karena pandemi Covid-19.

E. Dampak Buruknya Kualitas Udara dalam Ruang dan Upaya Mitigasinya

Kualitas udara dalam ruang memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan manusia. Paparan terhadap polutan udara dalam ruang dapat menimbulkan berbagai masalah kesehatan, mulai dari iritasi mata, hidung, dan tenggorokan, hingga kondisi yang lebih serius seperti penyakit jantung dan paru-paru. Partikel halus ($PM_{2.5}$), gas seperti nitrogen dioksida (NO_2), dan senyawa organik volatil (VOC) dapat menyebabkan iritasi pada mata, hidung, dan tenggorokan. Paparan jangka panjang terhadap polutan ini dapat menyebabkan atau memperburuk kondisi seperti asma, bronkitis, dan penyakit paru obstruktif kronis (PPOK) (Bălă et al., 2021; Mainka & Żak, 2022; Paterson et al., 2021).

Beberapa polutan udara dalam ruangan juga diketahui menjadi penyebab kanker. Sebagai contoh, formaldehida, yang sering ditemukan dalam banyak produk rumah tangga dan bahan bangunan, telah diklasifikasikan sebagai karsinogen manusia (Adamović et al., 2022; Protano et al., 2022). Paparan jangka panjang terhadap formaldehida dapat meningkatkan risiko kanker paru-

paru (Kwak et al., 2020). Selain itu, polutan udara dalam ruangan juga dapat memengaruhi kesehatan mental dan kognitif (Du, 2020; Manisalidis et al., 2020; Wang et al., 2021; Yin et al., 2020). Sebagai contoh, penelitian menunjukkan bahwa paparan terhadap polutan udara dalam ruangan dapat memengaruhi fungsi kognitif dan berkontribusi terhadap masalah kesehatan mental seperti depresi dan kecemasan.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Chandra et al. (2021b), dilakukan analisis terhadap data pasien dari rumah sakit yang berlokasi dalam radius 6 km dari lokasi pengukuran konsentrasi partikulat halus ($PM_{2.5}$) dan kasar (PM_{10}). Hasil analisis menunjukkan adanya keterkaitan antara paparan partikulat udara tersebut dengan penyakit pernapasan, dengan potensi dampak jangka panjang berupa PPOK dan penyakit jantung.

Lokasi pasien cenderung sangat terpapar oleh sumber polusi seperti daerah industri, jalan raya, perkembangan perumahan, dan kegiatan pembakaran sampah secara langsung. Evaluasi risiko kesehatan dilakukan menggunakan perangkat lunak AirQ+ dari WHO, yang memerlukan data masukan berupa rata-rata konsentrasi massa $PM_{2.5}$ dan PM_{10}, jumlah populasi, serta jumlah pasien yang menderita penyakit pernapasan. Dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa kondisi lingkungan udara luar sangat memengaruhi kualitas udara di dalam ruangan (Almetwally et al., 2020; Kumar et al., 2023; Usmani et al., 2020).

Perubahan iklim memiliki dampak yang signifikan terhadap kualitas udara dalam ruangan melalui beberapa mekanisme yang kompleks (Fuller et al., 2022; Masson et al., 2020). Salah satunya, peningkatan temperatur udara dapat memperbesar emisi polutan dari sumber-sumber dalam ruangan, seperti bahan bangunan dan perabot. Tidak hanya itu, peningkatan temperatur juga dapat meningkatkan kadar ozon di permukaan tanah (Li et al., 2020), yang kemudian dapat meresap ke dalam ruangan dan memengaruhi kualitas udara dalam ruangan tersebut. Selain itu, penggunaan pendingin udara yang lebih sering pada saat temperatur meningkat

dapat menyebabkan peningkatan emisi gas rumah kaca dan polutan udara lainnya (Dong et al., 2021; Sovacool et al., 2021).

Perubahan pola cuaca yang diakibatkan oleh perubahan iklim juga dapat memengaruhi tingkat polutan udara luar, seperti partikel halus dan gas nitrogen dioksida, yang pada akhirnya akan berdampak pada kualitas udara di dalam ruangan. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami dengan lebih baik bagaimana perubahan iklim dapat memengaruhi kualitas udara dalam ruangan. Hal ini penting untuk mengembangkan strategi yang lebih efektif dalam mengurangi paparan terhadap polutan udara dalam ruangan serta melindungi kesehatan manusia dari dampak negatif perubahan iklim.

Untuk itu, diperlukan strategi mitigasi yang konkret dan terukur untuk mengatasi dampak negatif dari polusi udara di dalam ruangan. Ada tiga strategi utama yang dapat diambil, yaitu pengendalian sumber emisi, peningkatan ventilasi, dan penggunaan pembersih udara (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2024).

Pengendalian sumber emisi, misalnya, melibatkan langkah-langkah praktis seperti mengganti produk pembersih yang mengandung senyawa organik volatil dengan alternatif yang lebih ramah lingkungan, atau memberlakukan larangan merokok di dalam ruangan. Penting juga untuk memahami jenis polutan yang ada, sumber emisinya, dan dampak kesehatannya terhadap penghuni ruangan (Tran et al., 2020). Dengan memperhatikan berbagai panduan yang dikeluarkan oleh organisasi seperti WHO atau USEPA, langkah-langkah pengendalian ini dapat diterapkan dengan lebih efektif. Namun, diperlukan penekanan lebih lanjut pada bagaimana langkah-langkah ini dapat diimplementasikan secara praktis dalam lingkungan sehari-hari. Dengan memperbaiki strategi mitigasi dan memberikan panduan praktis untuk implementasinya, kita dapat lebih efektif dalam menjaga kualitas udara dalam ruangan dan melindungi kesehatan penghuninya.

Peningkatan ventilasi menjadi langkah penting berikutnya dalam mengurangi konsentrasi polutan udara dalam ruangan.

Ventilasi yang baik tidak hanya membantu menghilangkan polutan yang ada dalam ruangan, tetapi juga menghadirkan udara segar yang lebih bersih. Sebagai contoh, dapur sering kali menjadi sumber utama polusi dalam ruangan, terutama selama aktivitas memasak, yang dapat menghasilkan partikel $PM_{2.5}$ dan gas CO_2 yang merugikan (Liu et al., 2020). Dalam penelitian terpisah, hal ini terlihat jelas dengan peningkatan konsentrasi massa $PM_{2.5}$ akibat perbedaan ventilasi di dua tipe rumah yang berbeda (Chandra et al., 2022). Hasil penelitian lainnya yang memanfaatkan teknik *Kriging* menunjukkan bahwa sumber utama CO_2 berasal dari aktivitas memasak dan jumlah penghuni, sementara partikel halus juga berasal dari infiltrasi udara luar (Putri et al., 2022). Namun, peningkatan ventilasi harus dilakukan secara hati-hati untuk mencegah masuknya polutan udara luar tambahan. Oleh karena itu, strategi ventilasi yang tepat dan efisien menjadi kunci dalam memastikan udara dalam ruangan tetap bersih dan sehat.

Terakhir, pembersih udara menjadi salah satu solusi untuk menghilangkan polutan dari udara dalam ruangan. Jenis pembersih udara termasuk filter udara, pembersih udara ionisasi, dan pembersih udara adsorpsi, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangannya sendiri. Sebagai contoh, penelitian oleh Rachmawati et al. (2023) mengembangkan "*smart air purifier*" yang mampu mengontrol kecepatan kipas untuk mengurangi konsentrasi partikulat di dalam ruang.

Dalam pengukuran yang dilakukan, tercatat pengurangan konsentrasi massa $PM_{2.5}$ kurang dari 35 $\mu g/m^3$ memerlukan waktu sekitar 150 detik dengan laju reduksi partikulat 0,01–0,02 per detik, laju udara bersih 0,07 m^3/menit, dan konsumsi daya sebesar 6,52 watt. Di sisi lain, penelitian oleh Sundari et al. (2024) menunjukkan bahwa penggunaan tanaman yang dimodifikasi dengan penambahan karbon, kipas, dan cahaya biru, dapat secara aktif meningkatkan daya serap polutan di dalam ruangan. Dalam rangka mencapai kesehatan yang optimal bagi penghuni ruang, diperlukan strategi mitigasi yang tepat dan kesadaran dari berbagai pihak untuk mengimplementasikan langkah-langkah pencegahan yang efektif.

Daftar Pustaka

Adamović et al. (2022). Occupational exposure to formaldehyde and cancer risk assessment in an anatomy laboratory. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*, 11198.

Almetwally et al. (2020). Ambient air pollution and its influence on human health and welfare: An overview. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*, 24815–24830.

Andhikari et al. (2006). Correlation of ambient inhalable bioaerosols with particulate matter and ozone: A two-year study. *Environmental Pollution*, *140*(1), 16–28.

Bălă et al. (2021). Air pollution exposure—the (in)visible risk factor for respiratory diseases. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*, 19615–19628.

Balmes. (2019). Household air pollution from domestic combustion of solid fuels and health. *Clinical Reviews in Allergy and Immunology*, *143*(6), 1979–1987.

Chandra et al. (2021a). Utilization of microsensors for air-quality monitoring systems. In *Handbook of Advanced Approaches Towards Pollution Prevention and Control, Volume 1* (pp. 307–324). [perlu dilengkapi: nama editor, penerbit]

Chandra et al. (2021b). Preliminary study: Health risk analysis of PM2.5 and PM10 mass concentrations in Bandung Metropolitan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *824*. [perlu nomor artikel]

Chandra et al. (2022). Pra-studi analisis paparan konsentrasi PM2,5 dan CO2 di dalam [judul tampak terpotong, cek naskah asli]. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, *24*(1), 98–106.

Diener & Mudu. (2021). How can vegetation protect us from air pollution? A critical review on green spaces' mitigation abilities for air-borne particles from a public health perspective—with implications for urban planning. *Science of the Total Environment*, *796*, 148605.

Dong et al. (2022). Greenhouse gas emissions from air conditioning and refrigeration service expansion in developing countries. *Annual Review of Environment and Resources*, *46*, 59–83.

Du et al. (2020). Indoor CO2 concentrations and cognitive function: A critical review. *Indoor Air*, *30*(6), 1067–1082.

Firdaus et al. (2020). Prastudi pemantauan bioaerosol di dalam ruangan dan analisisnya. *e-Proceeding of Engineering*, *7*(1), 1320.

Fuller et al. (2022). Pollution and health: A progress update. *Lancet Planetary Health*, *6*(6), 535–547.

Gonzalez-Chavarri et al. (2014). High-sensitivity indoor-air-quality sensor through localized growth of ZnO nanostructures. *Procedia Engineering*, *87*, 983–986.

Harčárová et al. (2020). Building materials as potential emission sources of VOC in the indoor environment of buildings. *Key Engineering Materials*, *838*, 74–80.

Hashemi et al. (2020). Occurrence, potential sources, in vitro bioaccessibility and health risk assessment of heavy metal in indoor dust from different microenvironment of Bushehr, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, *42*, 3641–3658.

Hoffmann et al. (2021). WHO air quality guidelines 2021—aiming for healthier air for all: A joint statement by medical, public health, scientific societies and patient representative organisations. *International Journal of Public Health*, *66*, 1604465.

Isaxon et al. (2015). Contribution of indoor-generated particles to residential exposure. *Atmospheric Environment*, *106*, 458–466.

Jalasena et al. (2023). Preliminary study of urgency to monitor indoor air quality at Telkom Education Area in the post-pandemic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1194*. [perlu nomor artikel]

Jha et al. (2020). Sources of heavy metal in indoor air quality. In Siddiqui et al. (Eds.), *Advances in air pollution profiling and control* (pp. xx–xx). Springer. [perlu rentang halaman & inisial nama editor]

Jung et al. (2023). Enhancing indoor air quality estimation: A spatially aware interpolation scheme. *International Journal of Geo-Information*, *12*(8), 347.

Kalamaras et al. (2019). Visual analytics for exploring air quality data in an AI-enhanced IoT environment. *Proceedings of the 11th International Conference on Management of Digital EcoSystems*, 103–110.

Kapoor et al. (2023). Prediction of indoor air quality using artificial intelligence. In *Machine Intelligence, Big Data Analytics, and IoT in Image Processing: Practical Applications* (pp. xx–xx). Scrivener Publishing. [perlu editor & rentang halaman]

Kitchilan et al. (2022). Air quality monitoring and prediction using IoT and machine learning approaches. *International Journal of Scientific and Research Publications*, *12*(3), 34–39.

Kumar et al. (2023). Critical review on emerging health effects associated with the indoor air quality and its sustainable management. *Science of the Total Environment*, *872*, 162163.

Kumie et al. (2009). Magnitude of indoor NO2 from biomass fuels in rural settings of Ethiopia. *Indoor Air*, *19*(1), 14–21.

Kwak et al. (2020). Occupational exposure to formaldehyde and risk of lung cancer: A systematic review and meta-analysis. *American Journal of Industrial Medicine*, *63*(4), 312–327.

Lazaridis & Aleksandropoulou. (2009). Sources and variability of indoor and outdoor gaseous aerosol precursors (O3, NOx and VOCs). *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, *9*, 3–13.

Li et al. (2020). Increases in surface ozone pollution in China from 2013 to 2019: Anthropogenic and meteorological influences. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *20*(19), 11423–11433.

Liu et al. (2020). Improving indoor air quality and thermal comfort in residential kitchens with a new ventilation system. *Building and Environment*, *180*, 107016.

Lugg & Probert. (1997). Indoor radon gas: A potential health hazard resulting from implementing energy-efficiency measures. *Applied Energy*, *56*(2), 93–196. [cek rentang halaman, tampak tidak wajar]

Mainka & Żak. (2022). Synergistic or antagonistic health effects of long- and short-term exposure to ambient NO2 and PM2.5: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(21), 14079.

Mani et al. (2021). AI powered IoT based real-time air pollution monitoring and forecasting. *Journal of Physics: Conference Series*, *2115*, 012016.

Manisalidis et al. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health*, *8*, Article 14. [cek: apakah "14" nomor artikel]

Masson et al. (2020). Urban climates and climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, *45*, 411–444.

Mfarrej et al. (2020). Investigation of indoor air quality inside houses from UAE. *Air, Soil and Water Research*, *13*. [perlu nomor artikel/ halaman]

Morawska et al. (2017). Airborne particles in indoor environment of homes, schools, offices and aged care facilities: The main routes of exposure. *Environment International*, *108*, 75–83.

Mousavi et al. (2019). Investigating the effect of several factors on concentrations of bioaerosols in a well-ventilated hospital environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*, 407.

Nafisah et al. (2021). Analisis paparan bioaerosol secara personal dalam kegiatan sehari-hari. *e-Proceeding of Engineering*, *8*(2), 1768.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2024). *Health risks of indoor exposure to fine particulate matter and practical mitigation solutions*. The National Academies Press.

Notman. (2020). How human biology and behavior affect indoor air quality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(37), 22619–22622.

Palomeque-Mangut et al. (2021). Electronic system for citizens' air quality mapping. *2021 IEEE Sensors*, Sydney, Australia, 1–4.

Paterson et al. (2021). Indoor PM2.5, VOCs and asthma outcomes: A systematic review in adults and their home environments. *Environmental Research*, *202*, 111631.

Protano et al. (2022). The carcinogenic effects of formaldehyde occupational exposure: A systematic review. *Cancers*, *14*(1), 165.

Putri et al. (2022). Spatial modelling of indoor air pollution distribution at home. *Journal of Physics: Conference Series*, *2243*. [perlu nomor artikel]

Rachmawati et al. (2023). Development of smart air purifier for reducing indoor particulate matter. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1157*. [perlu nomor artikel — urutan dipindah sebelum Rajasekar]

Rahmadani et al. (2021). Pengaruh ruang terbuka hijau dalam pengendalian konsentrasi PM2.5, CO2, dan O3 di Universitas Telkom. *e-Proceeding of Engineering*, *8*(2), 1852.

Rajasekar et al. (2020). Air quality monitoring and disease prediction using IoT and machine learning. *International Journal of Innovative Research in Computer Science and Technology*, *8*(6), 389–395.

Saad et al. (2017). Analysis of feature selection with probabilistic neural network (PNN) to classify sources influencing indoor air quality. *AIP Conference Proceedings*, *1808*(1), 020042.

Saini et al. (2021). Predicting indoor air quality: Integrating IoT with artificial intelligence. In *Internet of Things for Indoor Air Quality Monitoring* (pp. 51–67). Springer.

Saini et al. (Eds.). (2022). *Integrating IoT and AI for indoor air quality assessment*. Springer International Publishing.

Santos et al. (2020). Air quality monitoring using nanosensors. In *Nanomaterials for Air Remediation* (pp. 9–31). [perlu penerbit]

Seow et al. (2015). Indoor concentrations of nitrogen dioxide and sulfur dioxide from burning solid fuels for cooking and heating in Yunnan Province, China. *Indoor Air*, *26*(5), 776–783.

Shania et al. (2021). Pemantauan kualitas udara dalam ruang menggunakan impaktor di Gedung Deli, Universitas Telkom, Bandung. *e-Proceeding of Engineering*, *8*(2), 1820.

Shidki et al. (2020). Analisis kualitas udara dalam ruangan pada kantor terbuka di Universitas Telkom. *e-Proceeding of Engineering*, *7*(1), 1121.

Śmiełowska et al. (2017). Indoor air quality in public utility environments: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 11166–11176.

Sovacool et al. (2021). Climate change and industrial F-gases: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options for reducing synthetic greenhouse gas emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *141*, 110759.

Spyropoulos et al. (2021). Performance of aether low-cost sensor device for air pollution measurements in urban environments: Accuracy evaluation applying the air quality index (AQI). *Atmosphere*, *12*(10), 1246.

Srikant et al. (2008). Bio-aerosols in indoor environment: Composition, health effects and analysis. *Indian Journal of Medical Microbiology*, *26*(4), 302–312.

Sundari et al. (2023). Artificial neural network based prediction of PM2.5 mass concentration. *29th International Conference on Telecommunications (ICT)*, Toba, Indonesia, 1–6.

Sundari et al. (2024). Improved dynamic botanical air purifier with light effect for reducing CO2 concentration in chamber. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, *7*(1), 18–29.

Tahsiin et al. (2020). Analysis of indoor air quality based on low-cost sensors. *International Journal on Advanced Science, Engineering, and Information Technology*, *10*(6), 2627–2633.

Tran et al. (2020). Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(8), 2927.

Usmani et al. (2020). Air pollution and its health impacts in Malaysia: A review. *Air Quality, Atmosphere & Health*, *13*, 1093–1118.

Vardoulakis et al. (2020). Indoor exposure to selected air pollutants in the home environment: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(23), 8972.

Velichkova et al. (2019). Influence of indoor pollution and parameters on human health. In *Proceedings of the International Conference on Innovations in Science and Education* (pp. xx–xx). [perlu detail lengkap]

Villa-López et al. (2017). Indoor air quality monitor based on solidly mounted resonators for the detection of VOCs. *2017 IEEE Sensors*, Glasgow, UK, 1–3.

Wang et al. (2021). How indoor environmental quality affects occupants' cognitive functions: A systematic review. *Building and Environment*, *193*, 107647.

WHO Regional Office for Europe. (2010). *WHO guidelines for indoor air quality: Selected pollutants*. [perlu penerbit]

WHO. (2014). *WHO guidelines for indoor air quality: Household fuel combustion*. World Health Organization.

WHO. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide*. World Health Organization.

Yang et al. (2021). Current advances and future challenges of AIoT applications in particulate matters (PM) monitoring and control. *Journal of Hazardous Materials*, *419*, 126442.

Yin et al. (2020). Effects of biophilic indoor environment on stress and anxiety recovery: A between-subjects experiment in virtual reality. *Environment International*, *136*, 105427.

Bab VI
Deposisi Asam

Dyah Aries Tanti, Asri Indrawati, dan Nindia Noviastuti

Manusia dalam memenuhi kebutuhan hidupnya memanfaatkan dan mengeksploitasi sumber daya alam serta menggunakan berbagai sumber energi untuk menghasilkan fasilitas yang memudahkan kehidupan sehari-hari. Meskipun hal ini membawa kemudahan, penggunaan sumber daya dan energi ini juga menghasilkan emisi zat berbahaya yang menyebabkan polusi lingkungan.

Sejak era industrialisasi di berbagai negara, polusi udara telah menjadi masalah serius. Di perkotaan, transportasi adalah sumber utama emisi gas pencemar seperti SO_2, NO_x, CO, CO_2, CH_4, O_3, dan partikulat (Ferlita et al., 2023). Selain itu, sumber polusi udara alami seperti gunung berapi aktif juga berkontribusi pada pencemaran, mengeluarkan gas berbahaya seperti H_2S, SO_2, serta HCl dan HF yang berdampak pada lingkungan sekitarnya.

D. A. Tanti, A. Indrawati, & N. Noviastuti
Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: dyah.ariestanti@brin.go.id

© 2026 Editor & Penulis

Tanti, D. A., Indrawati, A. & Noviastuti, N. (2026). Deposisi Asam. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (101–119). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1810
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

Polusi udara menimbulkan berbagai masalah lingkungan, termasuk deposisi asam yang merupakan isu serius secara global. Deposisi asam merupakan peristiwa pengendapan zat asam yang ada di atmosfer ke bumi, baik secara basah dalam bentuk salju, hujan, kabut, dan embun maupun pengendapan secara kering dalam bentuk gas, partikel, uap, dan aerosol (Mohajan, 2019).

Sumber utama deposisi asam adalah sulfur oksida dan nitrogen oksida, yang berasal dari sumber alami ataupun antropogenik (Prakash et al., 2023). Emisi gas-gas tersebut meningkat di atmosfer disebabkan oleh meningkatnya aktivitas manusia seperti pembakaran biomassa, pembakaran bahan bakar fosil untuk kendaraan bermotor serta pembangkit listrik, dan kegiatan industri.

Deposisi asam kini menjadi masalah global yang mengkhawatirkan karena dampaknya terhadap ekologi, seperti kematian ikan di danau dan rawa, kerusakan hutan, serta kerusakan pada monumen dan artefak bersejarah. Selain itu, deposisi asam juga menimbulkan berbagai masalah kesehatan, termasuk iritasi mata, hidung, dan tenggorokan, serta gangguan paru-paru seperti batuk kering, asma, dan bronkitis, di samping keluhan lain seperti sakit kepala (Mohajan, 2019).

Pada pertengahan abad ke-19, fenomena deposisi asam pertama kali diobservasi di Eropa oleh seorang ilmuwan bernama Ducros pada tahun 1845, dan kemudian dikembangkan oleh peneliti asal Inggris, Robert Angus Smith, pada tahun 1852. Dalam penelitiannya, Smith mengaitkan emisi yang dihasilkan oleh industri sebagai sumber utama deposisi asam yang memengaruhi kualitas lingkungan (Fatima, 2021).

Pemantauan dan penelitian deposisi asam terus berlanjut hingga saat ini. Beberapa organisasi di dunia yang dinaungi oleh World Meteorological Organization (WMO) melakukan pemantauan deposisi asam, seperti *Canadian Air Pollution Monitoring Network* (CAPMoN), *National Atmospheric Deposition Program* (NADP), *Acid Deposition Monitoring Network in East Asia* (EANET), *International*

Network to study Deposition and Atmospheric Chemistry in Africa (IDAAF) (NEASPEC & ACAP, 2022). (Yamashita, 2022).

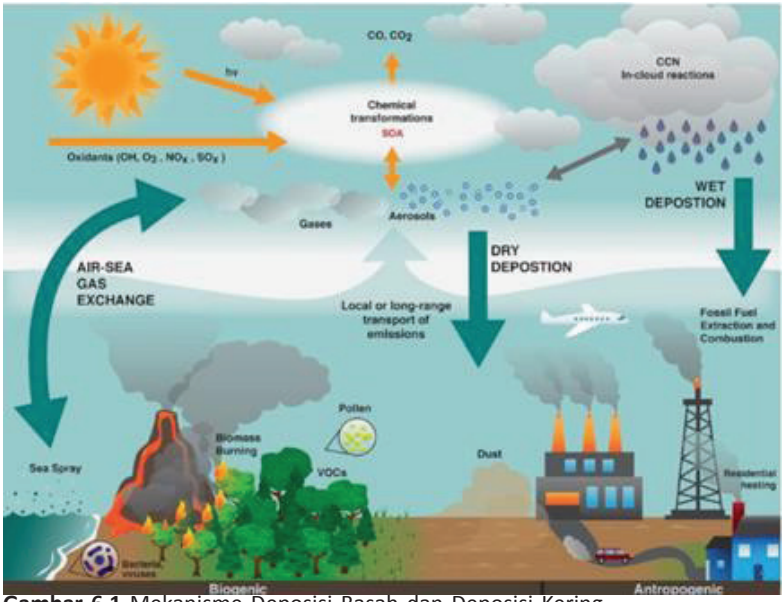
Sebagai negara berkembang, Indonesia tidak luput dari masalah deposisi asam. Monitoring deposisi asam dilakukan di Indonesia sejak tahun 1998 dengan keikutsertaannya dalam jaringan pemantauan deposisi asam di kawasan Asia Timur, yaitu EANET. Jaringan pemantauan deposisi asam di Indonesia berada di bawah koordinasi Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan sebagai National Focal Point (NFP). Pemantauan deposisi asam di Indonesia, baik berupa deposisi basah maupun deposisi kering, dilakukan oleh PSIKLH, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) dan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

A. Deposisi Asam

Deposisi asam dapat terjadi secara basah dan kering. Pada deposisi basah, gas dan partikel asam jatuh ke permukaan bumi dalam bentuk hujan, kabut, atau salju. Sementara itu, deposisi kering terjadi ketika gas, partikel, uap, dan aerosol menempel langsung pada permukaan bumi tanpa melibatkan presipitasi (Wondyfraw, 2014).

1. Deposisi Basah

Deposisi basah terjadi saat bahan kimia bersifat asam yang ada di udara turun ke permukaan bumi dalam bentuk hujan, salju, kabut, atau embun. Deposisi basah terjadi melalui dua proses, yaitu *rainout* dan *washout*. *Rainout* terjadi ketika aerosol dan gas polutan di atmosfer membentuk awan dan turun menjadi tetesan air hujan, sedangkan *washout* terjadi ketika aerosol dan gas yang ada di atmosfer tersapu oleh air hujan dan turun ke permukaan bumi (Carnelos et al., 2024). Zat asam akan masuk ke dalam tanah dan memengaruhi berbagai tanaman dan hewan serta aliran air tanah.



Gambar 6.1 Mekanisme Deposisi Basah dan Deposisi Kering

2. Deposisi Kering

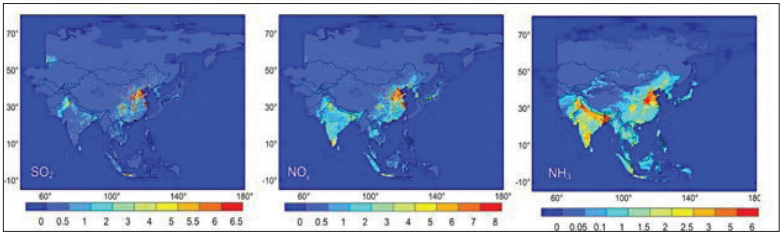
Deposisi kering berkaitan dengan gas dan partikel asam di atmosfer. Di daerah yang cuacanya kering, bahan asam turun ke bumi melalui deposisi kering. Partikel dan gas asam jatuh ke permukaan bumi akibat gaya gravitasi, atau bergabung dengan debu dan asap yang kemudian terbawa angin dan menempel pada tanah, tanaman, bangunan, mobil, dan benda lainnya. Keasaman di atmosfer sebagian besar turun kembali ke permukaan bumi melalui deposisi kering, yaitu hingga 20–60% dari total keasaman (How Does Dry, 2025). Saat hujan turun, partikel akan tercuci dan menghasilkan campuran yang lebih asam dan sangat korosif korosif (Carnelos et al., 2024).

B. Sumber Deposisi Asam

Penyebab terjadinya deposisi asam adalah dari sumber alami dan antropogenik. Kegiatan antropogenik menjadi penyumbang utama

deposisi asam di daerah perkotaan melalui bahan asan anorganik, seperti pembakaran bahan bakar fosil dari kegiatan transportasi dan industri. Sementara itu, di daerah pedesaan, sumber keasaman di atmosfer lebih banyak dihasilkan dari sumber alami seperti emisi bahan organik yang mudah menguap dari vegetasi, kotoran ternak, dan emisi dari laut (Payus et al., 2020).

Di atmosfer, gas-gas polutan akan bereaksi dengan uap air, oksigen, dan gas-gas lainnya membentuk asam sulfat, asam nitrat, dan amonium nitrat. Zat-zat asam tersebut akan turun ke permukaan bumi bersama air hujan sebagai hujan asam atau terbawa angin dan turun langsung mengenai tanah, tanaman, ataupun benda-benda lainnya.



Sumber: Duan et al. (2016)

Gambar 6.2 Emisi dari Prekusor Pengasaman Atmosfer di Asia pada Tahun 2010 Inventarisasi Emisi MIX Asia (unit: Gg/grid). Resolusi peta 0,25 x 0,25

Gambar 6.2 menyajikan distribusi spasial emisi SO_2, NO_x dan NH_3 di Asia pada tahun 2010 hasil dari inventarisasi MIX Asia (Duan et al., 2016), didapatkan bahwa emisi SO_2 dan NO_x umumnya dihasilkan selama konsumsi bahan bakar dan terkonsentrasi di wilayah-wilayah berpenduduk dengan konsumsi energi tinggi, seperti Cina Timur dan India. Sementara itu, emisi NH_3 cenderung tersebar di wilayah dengan aktivitas pertanian intensif, seperti Cina, India, dan Asia Tenggara.

Sumber polutan yang menyebabkan terjadinya hujan asam di Indonesia sebagian besar berasal dari kegiatan antropogenik, seperti transportasi dan kegiatan industri, terutama untuk daerah

perkotaan dengan kepadatan lalu lintas dan daerah pusat-pusat industri. Sementara itu, emisi NHx berasal dari kegiatan pertanian di daerah pedesaan, serta dari proses pembakaran pada kendaraan bermotor di daerah urban (Budiwati *et al*., 2016; Indrawati *et al*., 2019; Puji Lestari *et al*., 2008).

C. Reaksi Kimia Deposisi Asam

Keasaman dinyatakan dengan nilai pH dengan skala nilai pH (0–14). Air destilasi memiliki pH netral 7, sedangkan larutan dengan pH kurang dari 7 bersifat asam dan pH lebih dari 7 bersifat basa.

Skala pH bersifat logaritmik, penurunan nilai pH sebesar satu satuan menunjukkan peningkatan konsentrasi ion hidrogen sebanyak 10 kali, sedangkan penurunan sebesar dua satuan menunjukkan peningkatan konsentrasi ion hidrogen sebanyak 100 kali (Mohajan, 2018). Nilai pH pada larutan dihitung dengan rumus:

$$pH = -\text{Log}\ (H^+) \qquad \text{(R6-1)}$$

Air hujan secara alami bersifat asam dengan nilai pH sekitar 5,2 karena adanya reaksi antara karbon dioksida dan air membentuk asam karbonat.

$$H_2O(l) + CO_2(g) \rightarrow H_2CO_3(aq) \qquad \text{(R6-2)}$$

Asam karbonat merupakan asam lemah dan menyebabkan penurunan pH air hujan dengan tingkat yang bervariasi antara 6–5,2. Asam karbonat akan terionisasi dalam air membentuk ion hidronium dan karbonat:

$$2H_2O(l) + H_2CO_3(aq) \rightarrow CO32\text{-}(aq) + 2H_3O^+(aq) \qquad \text{(R6-3)}$$

Deposisi asam disebabkan oleh emisi dari SO_2 dan NO_x (NO dan NO_2). Reaksi kimia pembentukan hujan asam melibatkan interaksi antara SO_2, NO_x dan O_3. Di atmosfer, SO_2 dan NO_x dengan bantuan sinar matahari akan bereaksi dengan molekul air membentuk asam

sulfat dan asam nitrat. Penggunaan batu bara sebagai bahan bakar menghasilkan sulfur (S) yang akan membentuk SO_2.

$$S + O_2(g) \rightarrow SO_2(g) \quad \text{(R6-4)}$$

SO_2 di atmosfer bereaksi dengan oksigen membentuk SO3:

$$2SO_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2SO_3(g) \quad \text{(R6-5)}$$

SO_3 bereaksi dengan uap air di atmosfer membentuk H_2SO_4:

$$SO_3(g) + H_2O(l) \rightarrow H_2SO_4(aq) \quad \text{(R6-6)}$$

Oksidasi N2 dari emisi kendaraan:

$$N_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2NO(g) \quad \text{(R6-7)}$$

Nitrogen oksida (NO) bereaksi dengan oksigen (O_2) membentuk nitrogen dioksida (NO_2).

$$2NO(g) + O_2(g) \rightarrow 2NO_2(g) \quad \text{(R6-8)}$$

Konversi fotokimia menjadi HNO_3:

$$4NO_2(g) + O_2(g) + 2H2O(l) \rightarrow 4HNO_3(aq) \quad \text{(R6-9)}$$

D. Pemantauan Deposisi Asam

Pemantauan deposisi asam merupakan salah satu upaya yang dilakukan untuk mengukur dan memahami dampak yang ditimbulkan deposisi asam terhadap lingkungan. Kegiatan pemantauan deposisi asam terdiri atas pengumpulan dan analisis data terhadap deposisi basah dan deposisi kering. Hasil dari kegiatan pemantauan dapat memberikan masukan kepada pembuatan kebijakan yang terkait masalah lingkungan dalam menilai dan merumuskan strategi untuk mengurangi dampak negatif dari deposisi asam terhadap lingkungan. Beberapa aspek yang harus diperhatikan dalam kegiatan pemantauan deposisi asam adalah sebagai berikut.

1. Pengumpulan Sampel

Pengumpulan sampel merupakan tahap penting dalam melakukan pemantauan deposisi basah. Menurut manual pemantauan deposisi asam EANET (2010) yang harus diperhatikan dalam pengumpulan sampel meliputi hal-hal berikut.

a. Lokasi Sampling

Penempatan lokasi sampling memainkan peran penting dalam kualitas dan jenis data yang dihasilkan. Lokasi sampling harus merepresentasikan maksud dari kegiatan pemantauan deposisi asam. Kolokasi antara pemantauan deposisi basah dan deposisi kering yang dilengkapi dengan pemantauan data meteorologi sebaiknya dilakukan untuk memberikan data yang komprehensif.

b. Durasi Sampling

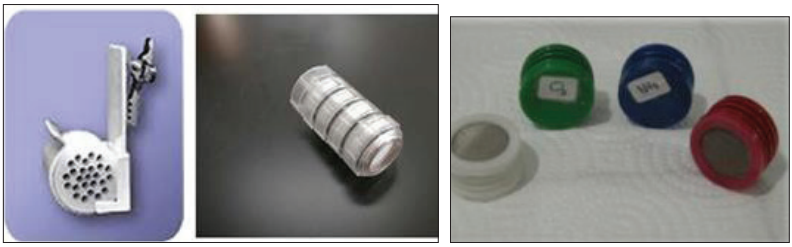
Durasi sampling untuk deposisi basah dan deposisi kering berbeda. Durasi sampling untuk deposisi basah dilakukan setiap hari hujan atau komposit selama 7 hari. Sementara itu, untuk sampling deposisi kering disesuaikan dengan metode sampling deposisi kering yang dilakukan.

c. Peralatan Sampling

Pada pemantauan deposisi basah, peralatan utama sampling yang dibutuhkan yaitu *rainwater/snow sampler*. Peralatan sampling deposisi basah biasanya dilengkapi dengan sensor untuk menggerakkan penutup sampler pada saat hujan atau turunnya salju. Sementara itu, untuk sampling deposisi kering, pemantauan dapat menggunakan beberapa peralatan, baik dengan metode aktif (misalnya *filterpack*) maupun pasif (misalnya *passive sampler*).

Sumber: EANET (2010)

Gambar 6.3 *Automatic Rain Sampler* untuk Sampling Deposisi Basah



(a) (b)

Keterangan: (a) Filter Pack; (b) Passive Sampler

Sumber: LAPAN (2016)

Gambar 6.4 Alat Sampling Deposisi Kering Analisis Laboratorium

Analisis kimia yang dilakukan pada sampel deposisi asam, baik deposisi basah maupun deposisi kering merupakan langkah penting dalam penentuan komposisi dan konsentrasi kimia dari total deposisi asam di atmosfer. Parameter kimia untuk deposisi asam dan metode analisanya terdapat pada Tabel 6.1 di bawah ini (EANET, 2010).

Tabel 6.1 Parameter dan Teknik Analisis Deposisi Asam

Analit	Teknik Analisis
Deposisi Basah:	
Konduktivitas	Sel konduktivitas
pH	Elektrode
Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}	Kromatografi ion, spektrofotometri
NH_4^+	Kromatografi ion, spektrofotometri (*indophenol blue*)
Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}	Kromatografi ion, *atomic absorption/emission spectrometry*
HCO_3^-	Kromatografi ion, alkalinitas, HPLC
NO_2^-, F^-, PO_4^{3-}	Kromatografi ion, spektrofotometri
Asam organik	Kromatografi ion
Logam berat, Al	*Atomic absorption spectrometry* (AAS) dengan *graphite furnace*, ICP, ICP/MS
Merkuri	AAS dengan *graphite furnace*, ICP, ICP/MS, *mercury analyzer*
Deposisi Kering:	
Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}	Kromatografi ion, spektrofotometri
NH_4^+	Kromatografi ion, spektrofotometri (*indophenol blue*)
NH_3	Kromatografi ion
SO_2, O_3	Kromatografi ion
NO_2	Spektrofotometri
HNO_3, HCl	Kromatografi ion
VOC	Kromatografi gas (GC)/MS

E. Dampak Deposisi Asam

Deposisi asam memberikan dampak pada lingkungan, ekosistem, dan juga kesehatan manusia. Baik deposisi basah maupun kering akan turun ke permukaan bumi dan menempel pada ekosistem hutan, tanah, kemudian mengalir ke danau dan sungai.

Emisi sulfur dioksida dan nitrogen oksida dari hujan asam menyebabkan iritasi mata, hidung, dan tenggorokan, serta gangguan paru-paru, seperti batuk kering, asma, sakit kepala, dan bronkitis. Hujan asam menyebabkan permasalahan ekonomi, sosial, dan

kesehatan secara luas, serta menjadi permasalahan secara global (Bhargava, 2013).

1 Efek pada Ikan dan Perairan

Deposisi asam menyebabkan peningkatan keasaman pada perairan seperti kolam, sungai, danau, teluk, dan perairan lainnya. Deposisi asam berdampak secara langsung dan tidak langsung terhadap kehidupan perairan.

Dampak secara langsung pada ikan di perairan antara lain dapat menyebabkan perubahan kimiawi darah dan terhambatnya perkembangan telur. Dampak tidak langsung menyebabkan berkurangnya ketersediaan makanan ikan serta kondisi perairan yang mengandung racun karena keasaman yang tinggi sehingga tidak mampu mendukung kehidupan makhluk hidup di dalamnya. Hal ini juga berakibat pada menipisnya kadar oksigen di dalam air sehingga banyak ikan yang mati karena kekurangan oksigen dan racun. Burung yang memakan ikan yang terkena dampak berbahaya ini juga akan terakumulasi oleh bahan kimia yang berbahaya dalam tubuhnya, kemudian diteruskan lagi ke hewan pemakan burung tersebut. Dengan demikian, bahan kimia berbahaya akan dimasukkan ke setiap tingkat rantai makanan (Bhargava, 2013).

Kapasitas penetral asam (ANC) dihubungkan dengan kesehatan biota, yang batas kritisnya ditetapkan sebesar 20 μeq/L. Apabila nilai ANC berada di atas ambang kritis tersebut, diperkirakan tidak terjadi penurunan populasi ikan trout cokelat dalam jangka panjang. Pada nilai ANC yang nol, populasi ikan trout menurun di 50% danau di Norwegia (Lien *et al*., 1996). Kehilangan spesies yang sensitif terhadap keasaman di semua tingkat trofik, termasuk produsen primer, makrofita, dan predator puncak seperti ikan dan unggas air, menyebabkan berkurangnya keanekaragaman hayati. Keasaman yang tinggi meningkatkan kelarutan ion aluminium, yang dapat beracun bagi ikan dan menjadi masalah di beberapa danau di Skotlandia pada masa lalu. Efek luas dari tingginya konsentrasi ion H^+ dan Al^{3+} dapat mengganggu produksi telur, keberhasilan penetasan, pengaturan osmosis, dan fungsi insang insang (APIS, 2010).

2. Efek pada Tanaman

Nilai pH tanah yang ideal untuk pertumbuhan tanaman antara 5 dan 8; di luar kisaran pH tersebut, tanaman akan kesulitan untuk berkecambah atau tumbuh. Tanaman tidak akan tumbuh pada pH kurang dari 3,7. Hujan asam tidak menyebabkan kerusakan pada tanaman secara langsung, tetapi secara perlahan akan melemahkan tanaman dengan merusak daunnya, membatasi nutrisi yang tersedia, atau menghasilkan zat beracun yang dilepaskan dari tanah.

Unsur hara penting tanah yang dibentuk oleh nitrogen (N), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan kalium (K) akan berkurang sehingga dapat memengaruhi pertumbuhan tanaman. Unsur logam seperti aluminium (Al), merkuri (Hg), mangan (Mn), kadmium (Cd), dan timbal (Pb) dalam tanah pada kondisi normal tidak bersifat racun, tetapi jika terjadi hujan asam, unsur-unsur tersebut akan menjadi racun bagi tanah dan menyebabkan kerusakan atau kematian pada tanaman dan pohon (Mohajan, 2018).

Pada tanaman pangan, hujan asam tidak terlalu berpengaruh, karena biasanya petani menambahkan pupuk ke tanah untuk mengganti nutrisi tanah dan menambahkan batu kapur yang akan meningkatkan kemampuan tanah melawan keasaman. Hasil penelitian terdahulu menunjukkan adanya perlambatan pada pertumbuhan hutan. Daun-daun mudah rontok dan berwarna cokelat sebelum waktunya. Hujan asam akan menyapu mineral dari daun dan tanah, serta menyumbat pori-pori daun sehingga daun tidak dapat menyerap karbon dioksida dengan baik.

Akibatnya, pertumbuhan tumbuhan akan terhambat serta mengakibatkan hilangnya daun dan kerusakan kulit kayu. Dalam kasus yang ekstrem, pohon dan sebagian besar tanaman mati tanpa diketahui penyebabnya. Meskipun beberapa tanaman dapat bertahan hidup setelah terkena dampak dari hujan asam, tanaman menjadi lemah dan tidak mampu bertahan dalam bencana alam seperti hujan lebat, angin kencang, dan kekeringan. Kekurangan kalsium pada pohon cemara menyebabkan pohon menjadi kurang tahan terhadap dingin dan mengalami kerusakan, bahkan mati saat musim dingin.

Efek pengasaman pada tanah di Belanda dilaporkan telah memengaruhi beberapa tumbuhan abadi seperti *Arnica* di dataran rendah, yang membuat respons tumbuhan tersebut menjadi kurang sensitif terhadap akumulasi $NH4^+$ di dalam tanah. Akumulasi ini terjadi karena nitrifikasi menjadi kurang efektif seiring dengan meningkatnya keasaman tanah (De Graaf et al., 1998).

3. Efek pada Tanah

Tanah mengandung unsur mineral berbahaya seperti merkuri dan aluminium, tetapi tidak dapat diserap oleh tanaman sehingga tidak berbahaya. Namun, setelah bereaksi dengan hujan asam, unsur-unsur tersebut membentuk senyawa logam yang berbahaya dan dapat diserap oleh tanaman. Senyawa ini tidak hanya membahayakan tanaman, tetapi juga membahayakan hewan yang memakannya. Sifat biologi dan kimia tanah dapat rusak karena hujan asam. Beberapa mikroba yang bermanfaat pada tanah juga tidak dapat hidup pada pH rendah (Bhargava, 2013).

4. Efek pada Bangunan dan Monumen

Hujan asam menyebabkan kerusakan pada bangunan dari batu kapur dan patung marmer. Saat ini, bahan bangunan sebagian besar menggunakan batu kapur dan marmer. Kedua bahan bangunan tersebut disukai dan banyak digunakan karena tahan lama dalam penggunaannya.

Batu kapur dan marmer mengandung kalsium karbonat ($CaCO_3$). Meskipun tahan lama, kedua bahan tersebut apabila digunakan sebagai bahan bangunan akan terkikis oleh hujan asam sedikit demi sedikit. Zat asam dalam air hujan akan bereaksi dengan $CaCO_3$ membentuk kalsium sulfat dan kalsium nitrat yang akan hanyut terbawa air hujan.

$$CaCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + 2H^+ + CO_3 \qquad \text{(R6-14)}$$

$$CaCO_3 + 2HNO_3 \rightarrow Ca\,(NO_3)_2 + CO_2 + H_2O \qquad \text{(R6-15)}$$

Proses ini terjadi pada permukaan bangunan atau monumen dan akan merusak bagian dalam batuan. Tingkat kerusakan dipengaruhi juga oleh jumlah aliran hujan yang mengenai permukaan batuan. Permukaan bangunan yang terkena langsung air hujan akan rentan terhadap erosi apabila dibandingkan dengan bagian yang terlindungi dari aliran air, misalnya di bagian bawah atap (Dubey, 2013).

Dampak dari hujan asam telah ditemukan di beberapa monumen dan bangunan terkenal di dunia, seperti Taj Mahal di India, Katedral St. Paul di London, dan Patung Liberty di New York. Gedung-gedung tinggi berbahan beton di perkotaan mengalami kerusakan akibat terkena air hujan dengan tingkat keasaman tinggi dalam jangka waktu lama. Curah hujan asam dengan tingkat pH berkisar antara 3,0 dan 5,0 telah memengaruhi bangunan dari semen dan beton. Benteng Merah Delhi dan Masjid Jama juga menunjukkan tanda-tanda kerusakan akibat polusi belerang. Hujan asam dapat merusak jendela pada gereja, jembatan baja, dan rel kereta api. Pada umumnya, efek dari hujan asam ini akan menimbulkan korosi pada logam, merusak warna cat, dan membentuk kerak pada permukaan kaca.

5. Efek pada Kesehatan Manusia

Deposisi asam tidak berdampak secara langsung pada manusia. Partikulat yang menyebabkan hujan asam dapat menyebabkan gangguan kesehatan manusia, yaitu masalah pada jantung dan paru-paru termasuk asma dan bronkitis.

Gas SO_2 dan NO_x juga membahayakan kesehatan manusia. Gas-gas ini berinteraksi di atmosfer membentuk partikel sulfat dan nitrat halus yang dapat diangkut dalam jarak jauh oleh angin dan terhirup ke dalam paru-paru manusia. SO_2 dalam bentuk gas dan aerosol dengan konsentrasi di atas 1,6 ppm menyebabkan iritasi mata dan mengganggu pernapasan. Selain itu, SO_2 apabila dikombinasikan dengan aerosol, kabut, dan asap akan membentuk suspensi halus yang dapat menembus paru-paru bagian dalam (Dubey, 2013).

Dampak tidak langsung dari deposisi asam terhadap manusia adalah ketergantungan terhadap ketersediaan tumbuhan, ikan, dan

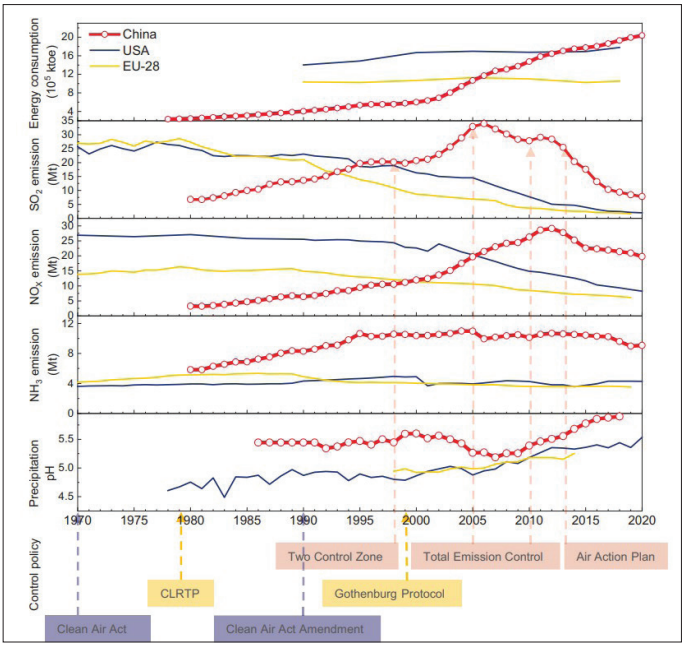
hewan sebagai makanan. Jika jumlahnya menurun karena efek hujan asam, manusia akan kekurangan bahan makanan. Selain itu, jika air tanaman atau hewan terkontaminasi oleh zat asam berbahaya dari hujan asam, kemudian dikonsumsi oleh manusia secara terus-menerus akan menyebabkan gangguan kesehatan manusia, baik gangguan ringan maupun berat hingga menyebabkan kematian.

F. Status Deposisi Asam

Pemantauan yang kontinyu dan kajian dari hasil pemantauan deposisi asam sebagai dasar kebijakan untuk perbaikan kualitas udara suatu wilayah. Menurut laporan dari U.S Environmental Protection Agency (USEPA), 2022, wilayah Amerika Serikat bagian timur memperlihatkan pengurangan deposisi sulfat, baik untuk deposisi basah maupun deposisi kering sebanyak 82% dari tahun 2000–2002 hingga rentang waktu 2020–2022. Penurunan konsentrasi NO_x secara umum lebih besar dibandingkan dengan penurunan deposisi NH_X. Total pengendapan NO_x sebesar 59%, sebaliknya terlihat adanya peningkatan untuk konsentrasi NH_X sebesar 43% dari kurun waktu tahun 2000–2002 hingga 2020–2022.

Kondisi yang serupa juga terjadi di Inggris, dengan konsentrasi keasaman dan sulfat dalam deposisi basah menurun masing-masing sebesar 85% dan 75% selama 20 tahun terakhir. Namun, penurunan ini tidak merata di seluruh Inggris. Daerah *remote* yang lokasinya jauh dari sumber polutan seperti di wilayah Inggris bagian tengah dan timur mengalami penurunan sulfat dalam deposisi basah lebih kecil, yaitu 57% dibandingkan dengan deposisi kering sebesar 93% (APIS, 2010).

Cina saat ini telah berhasil mengurangi emisi polutan yang bersifat asam, meskipun terjadi pertumbuhan ekonomi dan konsumsi energi yang signifikan. Penurunan emisi polutan ini menyebabkan adanya perbaikan tingkat keasaman (pH) air hujan. Namun, risiko terjadinya pengasaman ekologi dan eutrofikasi belum menunjukkan penurunan yang berarti.



Sumber: Yu et al. (2024)

Gambar 6.5 Tren Perkembangan Hujan Asam dan Variabel Terkait di Cina Dibandingkan dengan Eropa (EU-28) dan Amerika Serikat

Meskipun telah terjadi pengurangan emisi, penurunan area yang berisiko terhadap deposisi asam di Cina hanya sebesar 70%, masih tertinggal jauh dibandingkan dengan Eropa dan Amerika Serikat, yaitu sebanyak 20% dan 15% secara berurutan. Hal ini disebabkan oleh strategi pengurangan emisi di Cina berfokus pada peningkatan kualitas udara daripada mitigasi dampak ekologis (Yu et al., 2024).

Kondisi perbaikan kualitas udara dari hasil monitoring deposisi asam di Indonesia belum tampak adanya perbaikan. Berdasarkan hasil pemantauan deposisi asam di Indonesia untuk daerah Serpong, Jakarta, Bandung, Kototabang, dan Maros, pH air hujan menunjukkan tingkat keasaman di bawah nilai pH 5,6 (Puji Lestari et

al., 2008). Menurut laporan EANET (2020), untuk daerah perkotaan di Indonesia dominasi konsentrasi ion NH_4^+ dalam deposisi asam cukup tinggi apabila dibandingkan dengan konsentrasi nss-SO_4^{2-} dan NO_3^-. Untuk deposisi kering dengan pemantauan *filterpack* dari tahun 2015–2019 terlihat adanya kenaikan gas (SO_2, HNO_3, HCl, dan NH_3) dan aerosol (SO^{2-}, NO_3^-, Cl^-, NH^+, Na^+, K^+, Mg^{2+}, dan Ca^{2+}) untuk wilayah Bandung, sedangkan untuk wilayah Jakarta dan Serpong mengalami penurunan. Hal ini karena di Jakarta dan Serpong terdapat regulasi Gubernur mengenai transportasi publik termasuk penggunaan bahan bakar fosil, sehingga menyebabkan adanya perbaikan dari kualitas udara di Jakarta dan Serpong.

G. Penutup

Deposisi asam merupakan salah satu dampak dari polusi udara yang disebabkan oleh aktivitas manusia maupun proses alami. Dampaknya tidak hanya terbatas pada lingkungan, tetapi juga pada kesehatan manusia, ekosistem perairan, tanah, serta bangunan dan monumen bersejarah.

Upaya pengendalian emisi zat pencemar seperti sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO^-) sangat penting untuk mengurangi dampak negatif dari deposisi asam. Langkah-langkah seperti penggunaan teknologi ramah lingkungan, pengurangan bahan bakar fosil, serta pemantauan kualitas udara harus terus dioptimalkan. Kesadaran dan peran aktif dari berbagai pihak, baik pemerintah, industri, maupun masyarakat, menjadi kunci utama dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan menciptakan lingkungan yang lebih sehat bagi generasi mendatang.

Daftar Pustaka

APIS. (2010). Acid deposition. *UK Centre for Ecology & Hydrology*. https://www.apis.ac.uk/overview/pollutants/acid-deposition

Bhargava, S., & Bhargava, S. (2013). Ecological consequences of the acid rain. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, *5*(4), 19-24, https://www.iosrjournals.org

Budiwati, T., Setyawati, W., & Tanti, D. A. (2016). Chemical characteristics of rainwater in Sumatra, Indonesia, during 2001–2010. *International Journal of Atmospheric Sciences*, *2016*, 1–11. https://doi.org/10.1155/2016/1876046

Carnelos, D. A., Jobbagy, E., & Piñeiro, G. (2024). Rainout and washout contributions to wet atmospheric deposition in Southern South America. *Water, Air, and Soil Pollution*, *235*(3). https://doi.org/10.1007/s11270-024-06991-z

De Graaf, M. C. C., Bobbink, R., Roelofs, J. G. M., & Verbeek, P. J. M. (1998). Differential effects of ammonium and nitrate on three heathland species. *Plant Ecology*, *135*(2), 185–196. https://doi.org/10.1023/A:1009717613380

Duan, L., Yu, Q., Zhang, Q., Wang, Z., Pan, Y., Larssen, T., Tang, J., & Mulder, J. (2016). Acid deposition in Asia: Emissions, deposition, and ecosystem effects. *Atmospheric Environment*, *146*, 55–69. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.018

Dubey, S. (2013). Acid rain—The major cause of pollution: Its causes, effects and solution. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, *2*, [772–775].

EANET. (2010). Technical manual for wet deposition monitoring in East Asia -2010. *Network Center for EANET*. https://www.eanet.asia/wp-content/uploads/2019/04/techwet.pdf

Fatima, F. (2021). A review on acid rain: An environmental threat. *Pure and Applied Biology*, *10*(1), [301–310]. https://doi.org/10.19045/bspab.2021.100032

Ferlita, S., Sudarti, & Yushardi. (2023). Analisis efisiensi kendaraan listrik sebagai salah satu transportasi ramah lingkungan pengurang emisi karbon. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika, 7(2), 356–365. https://doi.org/10.37478/optika.v7i2.3282*.

How does dry deposition contribute to the overall problem of acid deposition? (2025). Sustainability Directory. https://pollution.sustainability-directory.com/learn/how-does-dry-deposition-contribute-to-the-overall-problem-of-acid-deposition/

Iavorivska, L., Boyer, E. W., & DeWalle, D. R. (2016). Atmospheric deposition of organic carbon via precipitation. *Atmospheric Environment*, *146*, 153–163. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.006

Indrawati, A., Tanti, D. A., Budiwati, T., & Sumaryati. (2019). The distribution of rainwater acidity in Bandung. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *303*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/303/1/012037

Lien, L., Raddum, G. G., Fjellheim, A., & Henriksen, A. (1996). A critical limit for acid neutralizing capacity in Norwegian surface waters, based on new analyses of fish and invertebrate responses. *Science of the Total Environment*, *177*(1–3), 173–193. https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04894-4

Mohajan, H. K. (2018). Acid rain is a local environment pollution but global concern. *Open Science Journal of Analytical Chemistry*, *3*(5), [47–55]. http://www.openscienceonline.com/journal/osjac

Payus, C. M., Jikilim, C., & Sentian, J. (2020). Rainwater chemistry of acid precipitation occurrences due to long-range transboundary haze pollution and prolonged drought events during southwest monsoon season: Climate change driven. *Heliyon*, *6*(9), Article e04997. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04997

Prakash, J., Agrawal, S. B., & Agrawal, M. (2023). Global trends of acidity in rainfall and its impact on plants and soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *23*(1), 398–419. https://doi.org/10.1007/s42729-022-01051-z

Wondyfraw, M. (2014). Mechanisms and effects of acid rain on environment. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, *5*(6), [204]. https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000204

Yu, Q., Ge, X., Zheng, H., Xing, J., Duan, L., Lv, D., Ding, D., Dong, Z., Sun, Y., Maximilian, P., Xie, D., Zhao, Y., Zhao, B., Wang, S., Mulder, J., Larssen, T., & Hao, J. (2024). A probe into the acid deposition mitigation path in China over the last four decades and beyond. *National Science Review*, *11*(4). https://doi.org/10.1093/nsr/nwae007

Bab VII
Polusi Udara sebagai *Silent Killer*: Dampak, Tantangan, dan Solusi

Nur Faizah Romadona dan Waluyo Eko Cahyono

A. Pendahuluan

Polusi udara merupakan masalah kompleks dan berbahaya yang dapat memengaruhi kesehatan manusia dan lingkungan. Polusi udara adalah kontaminasi lingkungan dalam atau luar ruangan oleh zat kimia, fisik, atau biologis yang mengubah karakteristik alami atmosfer. Sumber polusi udara secara umum berasal dari aktivitas rumah tangga, kendaraan bermotor, kegiatan industri, dan kebakaran hutan.

N. F. Romadona & W. E. Cahyono
Universitas Pendidikan Indonesia, *e-mail*: faizah@upi.edu

© 2026 Editor & Penulis

Romadona, N. F. & Cahyono, W. E. (2026). Polusi Udara sebagai *Silent Killer*: Dampak, Tantangan, dan Solusi. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (121–148). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1811
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

Polutan yang menjadi perhatian utama kesehatan masyarakat meliputi materi partikulat, karbon monoksida, ozon, nitrogen dioksida, dan sulfur dioksida. Polusi udara luar dan dalam ruangan menyebabkan penyakit pernapasan dan penyakit lainnya serta merupakan sumber penting sebagai penyebab penyakit dan kematian (WHO, 2024).

Masalah polusi udara adalah isu yang sangat penting di Indonesia, khususnya di kota-kota besar seperti Jakarta dan Surabaya. Polusi udara akibat aktivitas manusia (antropogenik) yang melebihi ambang batas standar dapat membahayakan kesehatan manusia secara signifikan, bahkan menyebabkan sekitar 8,1 juta kematian di seluruh dunia pada tahun 2021 dan menjadikannya faktor risiko kematian terbesar kedua, termasuk pada anak-anak di bawah usia lima tahun (UNICEF, 2024).

Sumber polutan udara di Indonesia beragam, mulai dari emisi kendaraan bermotor, asap industri, debu jalanan, hingga pembakaran hutan. Polusi udara berdampak terhadap kesehatan manusia, antara lain berupa gangguan saluran pernapasan, penyakit jantung, kanker, gangguan reproduksi, dan tekanan darah tinggi. Beberapa jenis zat dari polusi udara yang menyebabkan gangguan kesehatan adalah karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), sulfur oksida (SOx), *oksidan fotokimia*, dan partikel (Kemenkes RI, 2023).

Polusi udara bukan hanya menjadi masalah di Indonesia, melainkan juga menjadi *silent killer* (pembunuh senyap) di berbagai negara di seluruh dunia. Polusi udara disebut sebagai *silent killer* karena dampaknya yang tidak terlihat secara langsung, tetapi sangat merugikan bagi kesehatan manusia dan efek jangka panjangnya dapat mematikan (Raquel *et al*., 2013). Menurut penelitian yang dilakukan oleh WHO (*World Health Organization*) pada tahun 2019, polusi udara telah menjadi penyebab kematian akibat faktor lingkungan terbesar di dunia serta mengakibatkan lebih dari 6,7 juta kematian, dengan 89% kematian terjadi di negara berpenghasilan menengah-bawah. Dari jumlah itu, lebih dari 2 juta kematian

berasal dari Asia Tenggara. Sebanyak 85% kematian ini berkaitan dengan penyakit tidak menular (*non-communicable diseases*), seperti penyakit jantung iskemik, stroke, kanker paru-paru, asma, penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), dan diabetes. Hal ini menjadikan polusi udara sebagai penyebab kematian akibat penyakit tidak menular nomor dua di dunia, setelah tembakau (WHO, 2019).

Menyadari urgensi permasalahan polusi udara terhadap kesehatan manusia, penulis ingin mengulas secara komprehensif, mengidentifikasi tantangan yang dihadapi, dan menyajikan solusi potensial untuk mengatasi krisis ini. Tulisan ini diharapkan dapat menjadi kontribusi berharga dalam upaya bersama mewujudkan kondisi udara yang sehat untuk terciptanya masa depan yang lebih baik dan kesehatan optimal bagi generasi mendatang.

B. Dampak Polusi Udara terhadap Kesehatan Masyarakat

1. Dampak pada Sistem Pernapasan

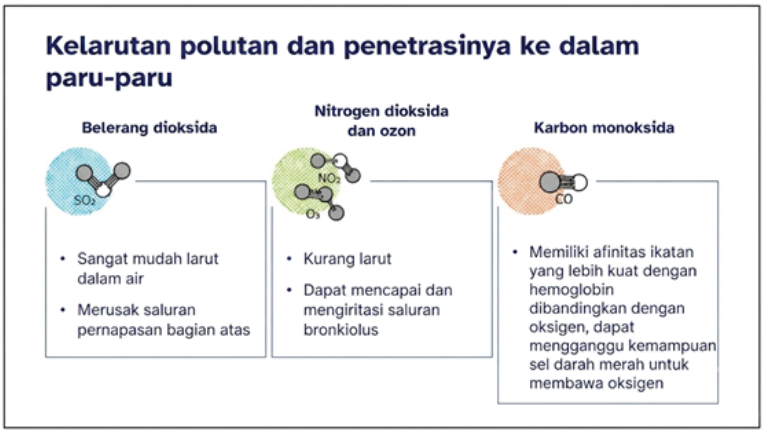
Menurut WHO, polusi udara telah menjadi ancaman serius bagi kesehatan global, sehingga dijuluki sebagai *"silent killer"* atau pembunuh senyap. Dampak kesehatan yang ditimbulkan sangat beragam, mulai dari stroke, penyakit jantung, hingga berbagai gangguan pernapasan seperti kanker paru-paru, penyakit paru obstruktif kronis, pneumonia, dan asma. Studi oleh Lelieveld et al. (2019) dalam *European Heart Journal* mengestimasi angka kematian global akibat polusi udara dapat mencapai 8,8 juta per tahun.

Menurut data WHO, beban kematian akibat polusi udara tersebar tidak merata di seluruh dunia. Wilayah Asia Tenggara dan Pasifik Barat masing-masing mencatat lebih dari 2 juta kematian per tahun. Wilayah Afrika mengalami sekitar 1 juta kematian, sementara wilayah Mediterania Timur dan Eropa masing-masing melaporkan 500.000 kematian. Di wilayah Amerika, angka kematian mencapai lebih dari 300.000 jiwa. Laporan dari UNEP (2019) menegaskan bahwa 92% populasi dunia menghirup udara yang tidak memenuhi standar kualitas udara WHO.

Menghadapi situasi ini, WHO telah menetapkan Pedoman Kualitas Udara yang bertujuan melindungi jutaan nyawa dari ancaman polusi udara. Dengan slogan "Udara Bersih untuk Kesehatan", WHO mengajak seluruh negara untuk berkomitmen mengurangi tingkat polusi udara. Langkah ini diharapkan dapat menurunkan risiko berbagai penyakit terkait polusi udara dan meningkatkan kualitas hidup masyarakat global. Penelitian oleh Burnett et al. (2018) menunjukkan bahwa tingkat polusi udara yang rendah pun dapat berdampak signifikan terhadap kesehatan serta menekankan pentingnya tindakan global yang lebih agresif dalam mengatasi masalah ini.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Bala (2021), sembilan dari sepuluh individu menghirup udara yang mengandung senyawa polutan yang berdampak besar pada jaringan paru-paru. Polutan seperti sulfur dioksida (SO_2), nitrogen dioksida (NO_2), karbon monoksida (CO), senyawa organik volatil (VOC), ozon (O_3), partikel materi, dan asap biomassa telah terbukti memiliki efek merugikan pada berbagai penyakit pernapasan seperti penyakit paru obstruktif kronis (PPOK), asma, kanker paru-paru, fibrosis paru idiopatik, infeksi pernapasan, bronkiektasis, dan tuberkolosis. Penelitian ini diperjelas dengan gambar 7.1 yang menjelaskan mekanisme kerusakan spesifik berdasarkan jenis polutannya. Gambar ini menunjukkan bahwa sulfur dioksida ($SO_2$2), yang sangat larut dalam air, cenderung merusak saluran pernapasan bagian atas. Sementara itu, nitrogen dioksida (NO_2) dan ozon (O_3), yang kurang larut, dapat menembus lebih dalam dan mengiritasi saluran bronkiolus. Karbon monoksida (CO) memiliki mekanisme yang berbeda, yaitu berikatan kuat dengan hemoglobin dalam darah dan mengganggu kemampuan sel darah merah untuk mengangkut oksigen.

Studi epidemiologi menunjukkan adanya hubungan yang signifikan antara polusi udara partikulat dan peningkatan kejadian penyakit pernapasan akut serta kematian akibat penyakit kardiovaskular dan pernapasan pada orang tua (Seaton, 2015). Infeksi saluran pernapasan akut adalah salah satu dari lima penyebab utama kematian global (WHO, 2022).



Sumber: WHO (2025)

Gambar 7.1 Mekanisme Kelarutan Polutan dan Penetrasi ke dalam Paru-paru

Sebanyak 17% kematian akibat infeksi saluran pernapasan bawah akut (pneumonia) disebabkan oleh polusi udara sekitar (WHO, 2022). Partikel-partikel ultra-halus dalam polusi udara perkotaan dapat memicu peradangan alveolar dan meningkatkan koagulabilitas darah, yang selanjutnya dapat memperburuk penyakit paru-paru dan meningkatkan kematian kardiovaskular.

Paparan polusi udara juga dikaitkan dengan perkembangan kanker paru-paru dan peningkatan insiden PPOK serta alergi pernapasan (Marino et al., 2015). Polusi udara dari lalu lintas, nitrogen dioksida, dan paparan asap rokok pasif merupakan faktor risiko signifikan untuk perkembangan asma pada anak-anak (Tiotiu et al., 2020).

Paparan polutan di luar ruangan dapat memicu gejala asma dan penurunan fungsi paru-paru. Anak-anak sangat rentan terhadap dampak polusi udara, terutama selama periode perkembangan organ dan pertumbuhan paru-paru (Goldizen et al., 2016).

Polutan udara dapat memengaruhi berbagai jenis sel imun, seperti makrofag, neutrofil inflamasi, sel dendritik, dan limfosit yang semuanya berperan dalam respons imun tubuh (Glencross

et al., 2020). Polusi udara dalam ruangan juga memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan, terutama pada anak-anak dan orang dengan penyakit paru-paru yang sudah ada sebelumnya (Maung et al., 2022). Secara keseluruhan, polusi udara partikulat telah terbukti meningkatkan risiko gejala pernapasan pada individu dengan penyakit paru-paru yang sudah ada, serta pada mereka yang tidak memiliki masalah pernapasan sebelumnya (Paulin & Hansel, 2016).

Kombinasi antara cuaca panas dan polusi udara luar ruangan juga dapat memperburuk dampak kesehatan pernapasan, terutama pada kelompok rentan seperti orang tua dan anak-anak (Grigorieva & Lukyanets, 2021). Partikel $PM_{2.5}$, yang dapat menembus jauh ke dalam paru-paru, telah terbukti merusak fungsi paru-paru dan memperburuk penyakit pernapasan (Xing et al., 2016).

Dua jenis polutan udara umum yang dapat memengaruhi kesehatan paru-paru, antara lain berikut ini (*Respiratory Health Association*, 2024).

a. Kabut ozon di permukaan tanah, disebut kabut asap, terbentuk oleh reaksi kimia antara senyawa organik yang mudah menguap (VOC) dan nitrogen oksida (NO_x) dengan adanya sinar matahari. VOC merupakan senyawa organik yang mudah berubah menjadi uap atau gas, yang salah satu sumber emisinya berasal dari knalpot mesin kendaraan. Gas NO_x dihasilkan dari reaksi antara nitrogen dan oksigen selama pembakaran. Salah satu penghasil gas NO_x terbesar adalah pembakaran bahan bakar mesin kendaraan. Konsentrasi ozon dapat mencapai tingkat yang berbahaya ketika cuaca panas dan cerah dengan sedikit atau tanpa angin. Tidak seperti ozon di atmosfer bagian atas, yang terbentuk secara alami dan bermanfaat karena sifat perlindungannya, ozon di permukaan tanah merupakan polutan udara buatan manusia yang dapat menimbulkan dampak berbahaya bagi manusia dan lingkungan. Tingkat ozon harian biasanya tertinggi pada siang hari dan terendah pada malam hari.
b. Materi partikulat halus, yang disebut jelaga, mengacu pada partikel atau tetesan kecil di udara (hampir tidak terlihat dengan

mata telanjang), biasanya merupakan produk sampingan dari pembakaran, seperti knalpot mobil dan diesel, emisi pembangkit listrik, atau asap kayu. Jelaga dapat mencapai tingkat tinggi pada kondisi cuaca yang sama seperti kabut asap. Hal ini juga dapat terjadi kapan saja sepanjang tahun ketika kondisi kering, tenang, dan cerah yang memungkinkan polusi partikel terkonsentrasi. Jelaga mengurangi visibilitas dan menyebabkan udara tampak kabur ketika kadarnya meningkat.

Mekanisme polutan partikel dalam memengaruhi sistem pernapasan (EPA, 2024) dapat dijelaskan sebagai berikut. Partikel yang tersimpan di saluran pernapasan dalam jumlah yang cukup akan menyebabkan peradangan. Tingkat peradangan paru tergantung pada dosis dan komposisi partikel. Misalnya, partikel karbon organik dan logam transisi dari sumber pembakaran dapat menimbulkan respons peradangan yang kuat.

Peradangan saluran napas akan meningkatkan responsnya terhadap iritan (misalnya udara dingin, polusi partikel, alergen, lipopolisakarida, dan polutan gas) dan menurunkan fungsi paru-paru dengan menyebabkan bronkokonstriksi. Pada tingkat sel, peradangan dapat merusak atau membunuh sel dan mengganggu integritas penghalang alveolar-kapiler. Paparan berulang terhadap polusi partikel memperburuk cedera awal dan memicu peradangan kronis dengan proliferasi sel dan reorganisasi matriks ekstraseluler (Berend, 2016). Keseimbangan keseluruhan antara cedera (aktivitas inflamasi) dan perbaikan (pertahanan antiinflamasi) memainkan peran penting dalam patogenesis dan perkembangan penyakit inflamasi pernapasan seperti asma.

Penelitian oleh Li et al. (2018) menunjukkan bahwa paparan partikel halus ($PM_{2.5}$) dapat mengaktifkan jalur sinyal pro-inflamasi, meningkatkan stres oksidatif, dan mengubah fungsi mitokondria di sel-sel paru. Lebih lanjut, Schraufnagel et al. (2019) melaporkan bahwa polusi udara tidak hanya memengaruhi sistem pernapasan, tetapi juga memengaruhi sistem

kardiovaskular, sistem saraf pusat, bahkan kesehatan reproduksi. Studi oleh Xing et al. (2016) mengungkapkan bahwa paparan jangka panjang terhadap polusi udara dapat menyebabkan perubahan epigenetik, yang berpotensi memengaruhi ekspresi gen terkait inflamasi dan respons imun. Kelly dan Fussell (2015) menekankan pentingnya memahami mekanisme molekuler sebagai efek dari polusi udara pada kesehatan manusia. Mereka menjelaskan bahwa partikel ultrafine dapat menembus *barrier* udara-darah di paru-paru dan masuk ke aliran darah, berpotensi menyebabkan efek sistemik di seluruh tubuh.

2. Peningkatan Risiko Kanker Paru-Paru

Gambar 7.2 mengungkapkan bahwa polusi udara dapat menyebabkan lima penyakit respirasi yang mengakibatkan kematian. Polusi udara telah lama diketahui sangat berbahaya bagi paru-paru dan saluran pernapasan. Menurut sebuah tinjauan *Forum of International Respiratory Societies Environmental Committee*, sekitar 500.000 kematian akibat kanker paru-paru berkaitan dengan polusi udara setiap tahunnya. Partikulat halus ($PM_{2.5}$) di udara merupakan salah satu polutan yang paling berbahaya dan telah diketahui sebagai faktor penyebab peningkatan risiko kanker paru-paru (Schraufnagel et al., 2019).

3. Dampak pada Sistem Kardiovaskular

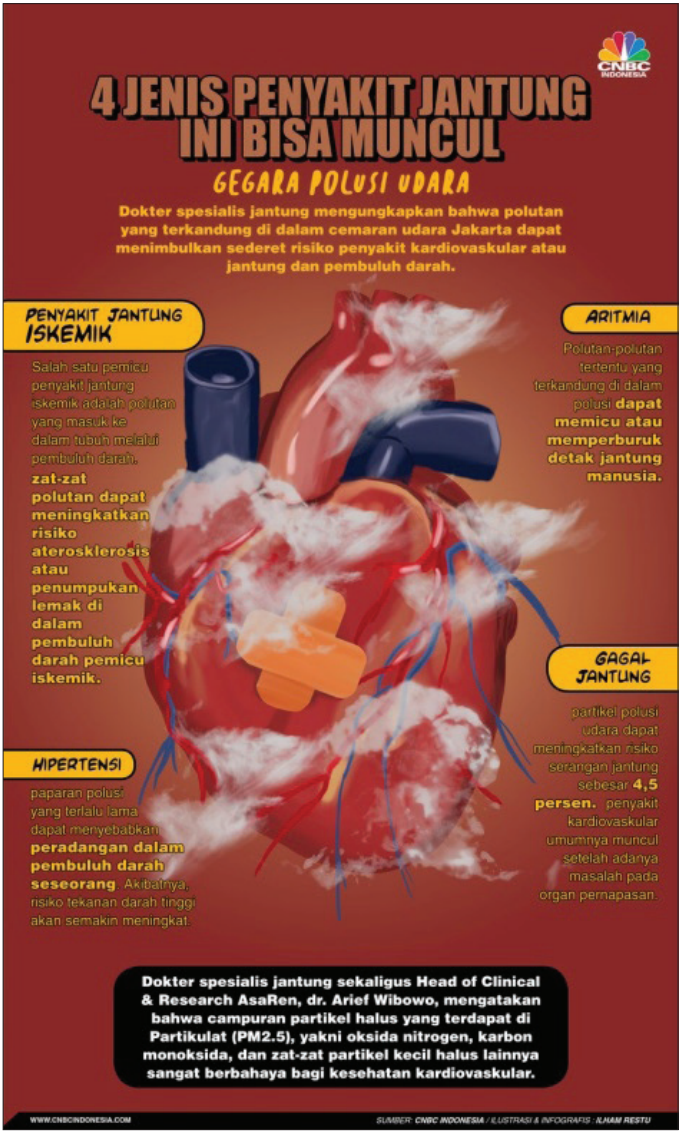
Diungkapkan oleh dokter spesialis jantung (Gambar 7.3) bahwa polutan yang terkandung dalam udara Jakarta dapat menimbulkan berbagai risiko penyakit kardiovaskular (jantung dan pembuluh darah) (Restu, 2023). Aerosol sulfat yang terhirup dapat menyebabkan dampak kesehatan yang lebih berat karena sifat korosif dan karsinogen. Polusi udara juga dikaitkan dengan penyakit kardiopulmoner, diabetes, sindrom metabolik, kondisi neurobehavioral, dan kelainan reproduksi (Khalida et al., 2023; Kurniawati, 2017;).

Dampak polusi udara dapat meningkatkan risiko terjadinya penyakit jantung, stroke, dan tekanan darah tinggi. Selain itu, polusi udara juga dapat memperburuk kondisi pasien yang sudah menderita penyakit kardiovaskular.

Polusi udara, khususnya $PM_{2.5}$, secara signifikan meningkatkan risiko penyakit kardiovaskular seperti peningkatan tekanan darah, sindrom koroner akut, dan gagal jantung (Lederer et al., 2021). Polusi udara menyebabkan stres oksidatif, inflamasi sistemik, disfungsi endotel, ketidakseimbangan otonom, dan perubahan koagulasi darah yang berkontribusi pada penyakit kardiovaskular. Paparan akut dan kronis terhadap polusi udara partikulat (PM) dapat berdampak pada peningkatan risiko kematian akibat penyakit kardiovaskular, termasuk penyakit jantung iskemik, gagal jantung, dan stroke iskemik/trombotik (Hamanaka & Mutlu, 2018).

Sumber: Humas RSUD dr. Iskak Tulungagung (2023)

Gambar 7.2 Dampak Polusi Udara terhadap Penyakit Respirasi



Sumber : Restu, A. (2023)

Gambar 7.3 Dampak Polusi Udara terhadap Penyakit Jantung

Polusi udara dapat meningkatkan risiko terjadinya aterosklerosis, inflamasi sistemik, dan disfungsi endotel pada sistem kardiovaskular. Aterosklerosis ditandai dengan inflamasi kronis pada dinding arteri yang dipicu oleh akumulasi lipoprotein plasma. Sel-sel inflamasi seperti makrofag, limfosit T, dan sel mast juga terakumulasi pada lesi trombotik. Inflamasi merupakan faktor penentu aterosklerosis, sehingga aterosklerosis dapat dianggap sebagai penyakit inflamasi kronis pada dinding arteri (Sukmawati, 2023).

Aterosklerosis merupakan kondisi yang ditandai dengan plak-plak lemak menumpuk di dalam dinding pembuluh darah serta menyebabkan penyempitan dan pengerasan arteri. Paparan partikel polusi udara 10 mikrom (PM_{10}) menyebabkan perkembangan aterosklerosis dan meningkatkan kerentanan terhadap pecahnya plak (Suwa, 2002).

Polusi udara menyebabkan stres oksidatif, inflamasi sistemik, disfungsi endotel, ketidakseimbangan otonom, dan perubahan koagulasi darah yang berkontribusi pada penyakit kardiovaskular. Disfungsi endotel dapat terjadi akibat paparan polusi udara dan dapat menyebabkan kerusakan pada dinding pembuluh darah serta meningkatkan risiko hipertensi dan aterosklerosis. Sel endotel merupakan lapisan terdalam dari pembuluh darah yang berperan penting dalam regulasi aliran darah dan tekanan darah (Azhari, 2017; Suiraoka, 2012).

Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa paparan jangka panjang terhadap polusi udara dapat meningkatkan risiko aritmia jantung, terutama fibrilasi atrium. Sebuah studi kohort yang dilakukan oleh Kim et al. (2019) menemukan bahwa peningkatan konsentrasi $PM_{2.5}$ sebesar 10 $\mu g/m^3$ dikaitkan dengan peningkatan risiko fibrilasi atrium sebesar 5,8%.

Polusi udara juga dapat memengaruhi variabilitas detak jantung, yang merupakan indikator penting dari kesehatan kardiovaskular. Sebuah meta-analisis yang dilakukan oleh Pieters et al. (2012) menunjukkan bahwa paparan jangka pendek terhadap polusi udara

dikaitkan dengan penurunan variabilitas detak jantung, yang dapat meningkatkan risiko kejadian kardiovaskular akut.

Oleh karena itu, upaya untuk mengurangi polusi udara dapat membantu mengurangi risiko terjadinya penyakit kardiovaskular dan meningkatkan kesehatan jantung dan pembuluh darah secara keseluruhan. Dengan demikian, kontrol dan pengendalian polusi udara sangat penting untuk menjaga kesehatan sistem kardiovaskular masyarakat.

4. Dampak pada Kesehatan Lainnya

a. Penyakit Kanker

Studi longitudinal yang melibatkan 66.280 penduduk Hong Kong berusia 65 tahun ke atas menyelidiki dampak paparan jangka panjang terhadap partikel halus ($PM_{2.5}$) pada risiko kematian akibat kanker. Penelitian ini mengungkapkan bahwa setiap peningkatan 10 $\mu g/m^3$ paparan $PM_{2.5}$ berkorelasi dengan peningkatan risiko kematian akibat kanker secara umum sebesar 22%, kanker saluran pencernaan atas 42%, kanker organ pencernaan tambahan 35%, kanker payudara 80%, dan kanker paru-paru 36%.

Mekanisme potensial di balik hubungan ini meliputi kerusakan fungsi perbaikan DNA, perubahan respons imun, dan peradangan yang memicu angiogenesis (American Association for Cancer Research, 2024). Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan hubungan antara polusi udara dan risiko kanker. Sebuah meta-analisis oleh Turner et al. (2020) mengonfirmasi bahwa paparan jangka panjang terhadap $PM_{2.5}$ secara signifikan meningkatkan risiko kematian akibat kanker paru-paru. Studi kohort di Eropa oleh Raaschou-Nielsen et al. (2021) juga menemukan hubungan positif antara paparan polusi udara dan insiden kanker paru-paru, terutama adenokarsinoma.

Selain itu, Niehoff et al. (2021) menemukan korelasi antara paparan NO_2 dan peningkatan risiko pada penderita kanker payudara familial. Penelitian ini memperkuat bukti bahwa polutan

udara dapat berinteraksi dengan faktor genetik dalam perkembangan kanker. Studi lain oleh Zhang et al. (2018) menunjukkan bahwa paparan jangka panjang terhadap $PM_{2.5}$ dan NO_2 juga dikaitkan dengan peningkatan risiko kanker hati dan menekankan dampak luas polusi udara pada berbagai jenis kanker.

Temuan-temuan ini menegaskan pentingnya kebijakan pengendalian polusi udara sebagai strategi pencegahan kanker di tingkat populasi (WHO, 2023). Implementasi langkah-langkah untuk mengurangi emisi dari sumber industri dan transportasi, serta peningkatan ruang hijau perkotaan, dapat memberikan manfaat signifikan bagi kesehatan masyarakat dalam jangka panjang (European Environment Agency, 2024).

b. Diabetes Melitus

Penelitian terbaru pada manusia dan hewan menunjukkan bahwa polusi udara merupakan faktor risiko penting untuk diabetes melitus tipe 2 (DMT2). Namun, mekanisme polusi udara menyebabkan kecenderungan diabetes belum sepenuhnya dipahami. Sejumlah penelitian epidemiologi menunjukkan hubungan positif antara paparan polusi udara sekitar dan risiko DMT2. Studi eksperimental pada model penyakit telah mendukung hubungan ini dan menyebut dalam patogenesis DMT2 adanya keterlibatan sistem kekebalan tubuh, adiposa, hati, dan sistem saraf pusat. Sejumlah penelitian pada hewan kini menunjukkan bahwa polusi udara dan komponen polusi udara dapat menyebabkan kelainan pada resistensi insulin (IR) *in vivo*.

Dalam salah satu studi pertama yang menunjukkan hubungan tersebut, Sun et al. (2009) mengamati peningkatan adipositas visceral, peradangan sistemik, dan peningkatan IR pada tikus C57BL/6 setelah 24 minggu paparan $PM_{2.5}$ ambien terkonsentrasi (rata-rata = 72,7 μg/m3) dalam sistem paparan seluruh tubuh. Sirkulasi TNF-**α**, IL-6, E-selectin, molekul adhesi intraseluler-1 (ICAM-1), inhibitor aktivator plasminogen-1, dan resistin meningkat secara signifikan pada tikus yang terpapar $PM_{2.5}$ dibandingkan dengan udara yang disaring (Sun et al., 2009). Gangguan sinyal insulin di

aorta dibuktikan dengan penurunan fosforilasi PI3K/Akt/endotelial nitric oxide synthase (eNOS) (Rao, 2015; Sun et al., 2009).

c. Gangguan Kesehatan Mental

Polusi udara juga berdampak pada sistem saraf pusat dan telah diketahui berkaitan dengan gangguan kesehatan mental seperti depresi dan kecemasan. Sebuah tinjauan sistematis menunjukkan bahwa paparan polusi udara, terutama yang terkait dengan lalu lintas dapat menyebabkan penurunan fungsi kognitif, perubahan perilaku, dan perkembangan psikomotor pada anak-anak serta penurunan kognitif dan risiko demensia yang lebih tinggi pada orang tua (De Prado Bert et al., 2018). Selain itu, penelitian lain menunjukkan bahwa polusi udara dapat meningkatkan risiko gangguan neuro-psikiatri seperti skizofrenia dan penyakit Alzheimer (Attademo & Bernardini, 2020).

d. Penurunan Fungsi Kognitif pada Anak-Anak

Penelitian juga menunjukkan bahwa polusi udara memiliki dampak negatif pada fungsi kognitif anak-anak. Sebuah tinjauan sistematis menemukan bahwa paparan polusi udara, seperti nitrogen dioksida (NO_2) dan partikulat halus ($PM_{2.5}$), dikaitkan dengan penurunan memori kerja, fungsi kognitif umum, dan fungsi psikomotor pada anak-anak (Lopuszanska & Samardakiewicz, 2020).

Studi lain menunjukkan bahwa paparan polusi udara selama masa kanak-kanak dapat menghambat perkembangan otak dan kinerja akademik (Clifford et al., 2016). Secara keseluruhan menunjukkan bukti bahwa polusi udara memiliki dampak yang signifikan terhadap kesehatan paru-paru, kesehatan mental, dan perkembangan kognitif anak-anak. Oleh karena itu, sangat penting bagi pemerintah dan masyarakat untuk terus berupaya mengurangi polusi udara demi kesehatan dan kesejahteraan masyarakat masa sekarang dan mendatang.

e. Polusi Udara sebagai *Silent Killer*

Polusi udara telah menjadi masalah yang sangat serius dan berbahaya, sehingga mendapat julukan *silent killer* karena efeknya yang tidak langsung dan berbahaya terhadap kesehatan manusia. Sekitar 4,2 juta orang meninggal secara dini setiap tahunnya akibat penyakit yang disebabkan oleh polusi udara. Dari kematian tersebut, sebanyak 38% disebabkan oleh penyakit jantung iskemik, 20% disebabkan oleh stroke, 18% disebabkan oleh penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), 18% disebabkan oleh infeksi saluran pernapasan bawah akut, dan sisanya 6% disebabkan oleh kanker paru-paru (WHO, 2018).

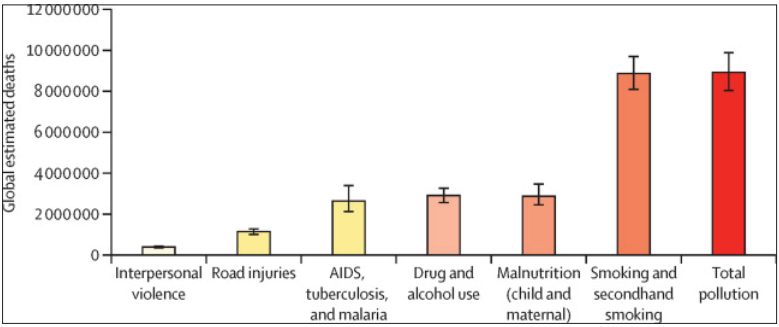
India memiliki tingkat polusi udara tertinggi di dunia, dengan New Delhi sebagai salah satu kota paling tercemar. Tingginya polusi udara di kota tersebut disebabkan oleh emisi kendaraan bermotor, industri, dan pembakaran bahan bakar fosil.

Sebuah studi menemukan bahwa polusi udara di India menyebabkan 1,6 juta kematian dini (Mohan, 2016; WHO, 2022). Cina telah mengalami kemajuan dalam memerangi polusi udara dalam beberapa tahun terakhir. Akan tetapi, beberapa kota di Cina masih menjadi masalah besar akibat emisi dari industri, pembangkit listrik batu bara, dan pembakaran bahan bakar fosil.

Pada tahun 2017, sebuah studi menemukan bahwa polusi udara di Cina menyebabkan sekitar 1,1 juta kematian dini (Cohen, et al., 2017; World Bank, 2021). Polusi udara di Inggris terutama berasal dari emisi kendaraan bermotor, pembakaran batu bara, dan industri. Pada tahun 2020, sebuah studi menemukan bahwa polusi udara di Inggris menyebabkan sekitar 40.000 kematian dini (Royal College of Physicians, 2016; Department for Environment, Food & Rural Affairs, 2023).

Perbandingan dampak polusi terhadap morbiditas dan mortalitas dengan dampak faktor risiko lain terhadap morbiditas dan mortalitas menunjukkan bahwa polusi terus menjadi salah satu faktor risiko terbesar terhadap penyakit dan kematian dini secara

global. Dampak polusi terhadap kesehatan masih jauh lebih besar dibandingkan dengan dampak perang, terorisme, malaria, HIV, tuberkulosis, obat-obatan terlarang, dan alkohol. Bahkan, jumlah kematian yang disebabkan oleh polusi setara dengan kematian akibat merokok seperti tampak pada Gambar 7.4 (Fuller et al., 2022).



Sumber: Fuller et al (2022)

Gambar 7.4 Estimasi Kematian Global Tahunan Berdasarkan Faktor Risiko Terpilih

D. Tantangan dalam Mengatasi Polusi Udara di Indonesia

Mengatasi polusi udara di Indonesia merupakan hal yang kompleks dan memerlukan kerja sama dari berbagai pihak. Selain itu, perlu adanya kebijakan yang lebih ketat dan penegakan hukum yang lebih tegas untuk mengurangi emisi polutan udara. Pendidikan masyarakat mengenai pentingnya menjaga lingkungan juga perlu ditingkatkan agar kesadaran akan dampak buruk polusi udara makin meningkat.

Berikut ini beberapa aspek yang perlu diperhatikan dalam upaya mengatasi polusi udara sebagai *silent killer.*

1. Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor yang Tinggi

Kendaraan bermotor merupakan salah satu penyumbang utama polusi udara di Indonesia, terutama di kota-kota besar (Kusmin-ingrum, 2007). Keberadaan kendaraan di Indonesia, baik mobil

pribadi maupun angkutan umum, kendaraan roda dua, dan roda empat atau lebih, sangat tinggi. Tabel 7.1 menyajikan data kendaraan bermotor dan jumlah penduduk pada tahun 2021 hingga 2022 di Indonesia. Berdasarkan data ini, terlihat bahwa dalam kurun waktu 2021–2022 kendaraan bermotor mengalami pertumbuhan yang sangat pesat, yaitu enam juta lebih untuk semua jenis kendaraan bermotor, dengan pertumbuhan jumlah penduduk sebesar tiga juta. Jika dibandingkan dengan data penduduknya, jumlah kendaraan bermotor pada tahun 2021 sudah lebih dari setengah penduduk Indonesia.

Tabel 7.1 Jumlah Penduduk dan Kendaraan Bermotor Tahun 2021 hingga Tahun 2022 di Indonesia

	2021	2022
Jumlah Penduduk	272.682.500	275.773.800
Kendaraan bermotor		
Mobil Penumpang	16.413.348	17.168.862
Mobil Bis	237.566	243.450
Mobil Barang	5.299.361	5.544.173
Sepeda motor	120.042.298	125.305.332
Jumlah kendaraan bermotor	141.992.573	148.261.617

Sumber: Badan Pusat Statistik (2024a dan 2024b)

Selain itu, industri juga turut berperan dalam meningkatkan emisi polutan udara dan juga gas rumah kaca. Oleh karena itu, langkah-langkah konkret perlu segera diimplementasikan untuk mengatasi masalah ini demi menjaga kualitas udara yang lebih baik bagi generasi mendatang.

2. Aktivitas Industri yang Menghasilkan Emisi Polutan Udara

Aktivitas dari sektor industri menghasilkan emisi polutan udara yang cukup tinggi. Di samping itu, sektor pertanian juga berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca melalui penggunaan pupuk dan pestisida kimia yang berlebihan. Semua faktor itu menyebabkan

kualitas udara makin buruk dan berdampak negatif pada kesehatan masyarakat (Corie & Sudarmaji, 2005).

Oleh karena itu, peningkatan pengawasan dan penegakan hukum terhadap industri sebagai sumber emisi polutan udara sangat penting dilakukan oleh pemerintah. Salah satu langkah yang dapat diambil adalah dengan meningkatkan inspeksi dan pengawasan terhadap industri-industri yang menjadi sumber utama polusi udara. Dengan demikian, diharapkan dapat tercipta lingkungan yang lebih bersih dan sehat bagi masyarakat.

3. Kebakaran Hutan dan Lahan

Kebakaran hutan dan lahan merupakan salah satu penyebab utama dari emisi gas rumah kaca di Indonesia. Setiap tahun, ribuan hektar hutan dan lahan terbakar menyebabkan pelepasan gas-gas berbahaya ke atmosfer. Selain merusak lingkungan dan mengancam keanekaragaman hayati, kebakaran hutan dan lahan juga berdampak pada kualitas udara dan kesehatan masyarakat. Oleh karena itu, penting bagi pemerintah dan masyarakat untuk bekerja sama dalam menciptakan lingkungan yang lebih bersih dan sehat berupa pencegahan dan penanggulangan kebakaran hutan dan lahan.

4. Kurangnya Kesadaran Masyarakat tentang Dampak Polusi Udara

Pengetahuan dan kesadaran masyarakat tentang pentingnya menjaga lingkungan dan mengurangi polusi udara masih perlu ditingkatkan. Banyak orang masih kurang memahami dampak buruk dari polusi udara terhadap kesehatan manusia dan lingkungan sekitarnya. Oleh karena itu, edukasi dan sosialisasi tentang pentingnya menjaga udara bersih perlu terus dilakukan agar masyarakat dapat berperan aktif dalam upaya pelestarian lingkungan. Selain itu, peran pemerintah dan lembaga terkait juga sangat signifikan dalam memberikan regulasi dan penegakan hukum terkait polusi udara untuk mencegah kerusakan lebih lanjut bagi generasi penerus.

5. Lemahnya Penegakan Hukum

Akibat lemahnya penegakan hukum terkait polusi udara menyebabkan peningkatan jumlah kasus penyakit yang berkaitan dengan polusi udara, seperti penyakit pernapasan, kardiovaskular, dan kanker. Hal ini tentu akan berdampak negatif pada kesehatan masyarakat secara keseluruhan. Oleh karena itu, penting bagi pemerintah untuk meningkatkan penegakan hukum terkait polusi udara agar dapat melindungi masyarakat dari dampak buruk polusi udara. Dengan demikian, penegakan hukum yang konsisten dan tegas menjadi salah satu faktor utama dalam menjaga keberlanjutan lingkungan hidup. Selain itu, tanggung jawab negara dalam perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup juga merupakan hal yang prioritas untuk menjaga lingkungan hidup yang baik dan sehat bagi generasi mendatang.

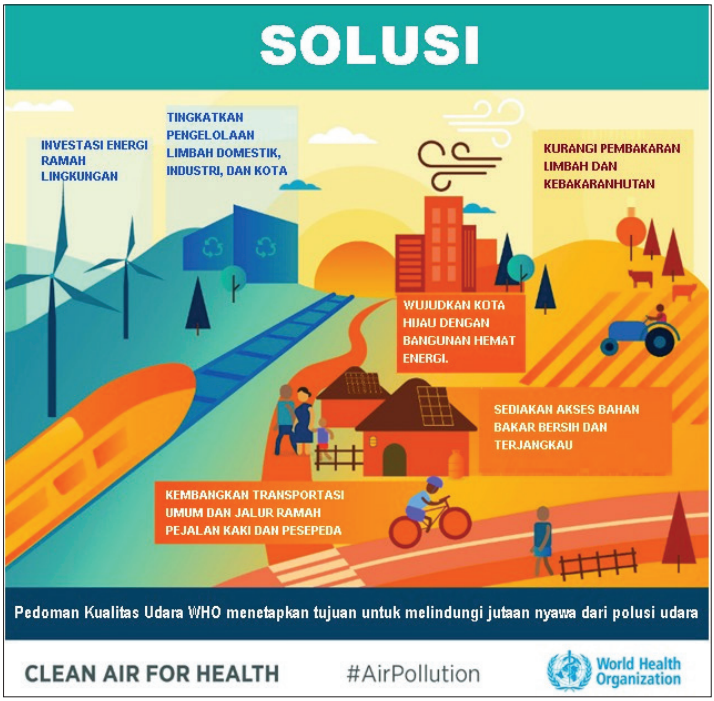
E. Solusi untuk Mengatasi Polusi Udara di Indonesia

Mitigasi dampak polusi udara memerlukan implementasi berbagai tindakan preventif dan kuratif guna mereduksi emisi gas berbahaya ke atmosfer. Salah satu strategi efektif adalah dengan mengurangi penggunaan kendaraan bermotor berbahan bakar fosil. Selain itu, diperlukan peningkatan pengawasan terhadap sektor industri yang berpotensi besar menghasilkan polutan udara.

Edukasi masyarakat mengenai signifikansi kualitas udara dan konsekuensi negatif polusi terhadap kesehatan manusia serta lingkungan juga merupakan komponen krusial. Urgensi solusi ini didasarkan pada fakta bahwa polusi udara di kawasan urban Indonesia telah mengakibatkan degradasi kualitas udara, mengganggu kenyamanan, bahkan menyebabkan gangguan kesehatan (Cahyono, 2016).

Implementasi kebijakan yang berwawasan lingkungan, seperti mendorong penggunaan transportasi publik ramah lingkungan, merupakan langkah strategis selanjutnya untuk solusi yang digambarkan secara jelas oleh WHO (2021) seperti pada Gambar 7.5.

WHO (2021) merekomendasikan beberapa solusi komprehensif yang mencakup berbagai sektor untuk meningkatkan kualitas udara dan mengurangi polusi. Pertama, efisiensi energi perlu ditingkatkan dengan mendorong pembangkit listrik hemat energi dan penggunaan sumber energi terbarukan seperti turbin angin. Kedua, praktik pengelolaan limbah domestik, industri, dan pertanian harus diperbaiki untuk mengurangi emisi polutan. Ketiga, perencanaan kota yang lebih baik diperlukan untuk menciptakan lingkungan perkotaan yang lebih hijau dan kompak dengan bangunan hemat energi. Keempat, pengembangan sistem transportasi umum yang aman dan terjangkau, serta jaringan ramah pejalan kaki dan pesepeda, sangat penting untuk mengurangi emisi dari sektor transportasi. Kelima, praktik pertanian perlu dimodifikasi untuk mengurangi pembakaran limbah dan kegiatan yang berkontribusi pada polusi udara. Terakhir, penyediaan akses universal ke bahan bakar dan teknologi bersih yang terjangkau untuk kebutuhan rumah tangga seperti memasak, memanaskan, dan menggunakan penerangan merupakan langkah signifikan. Implementasi solusi ini secara menyeluruh diharapkan dapat melindungi jutaan nyawa dari dampak negatif polusi udara dengan menangani berbagai sumber polusi di berbagai sektor.



Sumber: WHO (2021)

Gambar 7.5 Solusi untuk Mengatasi Polusi Udara

F. Kesimpulan

Polusi udara merupakan masalah yang sangat serius dan berbahaya yang dapat memengaruhi kesehatan manusia dan lingkungan. Polusi udara telah menjadi ancaman bagi kesehatan manusia dan lingkungan dan sering kali disebut sebagai "*silent killer*" karena dampaknya yang tidak langsung terlihat, tetapi sangat merusak.

Polusi udara telah menjadi masalah yang sangat urgen di beberapa negara dunia, termasuk Indonesia. Dampak polusi udara tidak hanya terbatas pada kesehatan masyarakat, tetapi juga pada lingkungan dan ekonomi. Dampak polusi udara dapat menyebabkan

kematian dini, penurunan harapan hidup, berbagai penyakit seperti asma, bronkitis, dan kanker paru-paru.

Tantangan yang dihadapi dalam mengatasi polusi udara adalah meningkatnya penggunaan kendaraan bermotor dan kegiatan industri yang menghasilkan emisi polusi udara. Solusi potensial untuk mengurangi dampak polusi udara adalah meningkatkan penggunaan transportasi yang ramah lingkungan, seperti menggunakan kendaraan listrik atau berbasis bahan bakar alternatif. Selain itu, perlu adanya pengawasan dan pengendalian emisi gas rumah kaca dari industri dan penggunaan teknologi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Dengan demikian, upaya untuk melawan *"silent killer"* polusi udara di Indonesia harus terus didorong agar kualitas udara dapat terjaga dengan baik. Dengan langkah-langkah yang terintegrasi dan berkelanjutan, diharapkan polusi udara di Indonesia dapat dikendalikan dan lingkungan hidup dapat terjaga dengan baik untuk generasi mendatang.

Daftar Pustaka

American Association for Cancer Research. (2024). Long-term exposure to air pollution linked to higher cancer-related death risk. *Cancer Discovery*, *14*(3), 456–468.

Arsyad, K. A., & Priyana, Y. (2023). Studi kausalitas antara polusi udara dan kejadian penyakit saluran pernapasan pada penduduk Kota Bogor, Jawa Barat, Indonesia. *Jurnal Multidisiplin West Science*, 2(6), 462472. https://doi.org/10.58812/jmws.v2i6.434

Attademo, L., & Bernardini, F. (2020). Air pollution as risk factor for mental disorders: In search for a possible link with Alzheimer's disease and schizophrenia. *Journal of Alzheimer's Disease*. https://doi.org/10.3233/JAD-200289

Azhari, M. H. (2017). Faktor risiko disfungsi endotel pada laki-laki dewasa muda. *Jurnal Kesehatan Andalas*, *6*(1), 237–241.

Badan Pusat Statistik. (2024a). *Jumlah penduduk pertengahan tahun (ribu jiwa), 2022–2024*. https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/NTcjMg==/perkembangan-jumlah-kendaraan-bermotor-menurut-jenis--unit-.html

Badan Pusat Statistik. (2024b). *Jumlah penduduk pertengahan tahun (ribu jiwa), 2022–2024*. https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/MTk3NSMy/jumlah-penduduk-pertengahan-tahun--ribu-jiwa-.html

Berend, N. (2016). Contribution of air pollution to COPD and small airway dysfunction. *Respirology*, *21*(2), 237–244.

Burnett, R., Chen, H., Szyszkowicz, M., Fann, N., Hubbell, B., Pope, C. A., Apte, J. S., Brauer, M., Cohen, A., Weichenthal, S., Coggins, J., Di, Q., Brunekreef, B., Frostad, J., Lim, S. S., Kan, H., Walker, K. D., Thurston, G. D., Hayes, R. B., … Spadaro, J. V. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *115*(38), 9592–9597.

Cahyono, W. E. (2016). Penyebaran pencemar udara di Kota Yogyakarta. *Seminar Nasional Pendidikan dan Saintek*, *2016*, 369–375.

Clifford, A., Lang, L., Chen, R., Anstey, K. J., & Seaton, A. (2016). Exposure to air pollution and cognitive functioning across the life course – A systematic literature review. *Environmental Research*, *147*, 383–398. https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.01.018

Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Hubbell, B., Jobling, A., Kan, H., Knibbs, L., Liu, Y., Martin, R., Morawska, L., ... Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: An analysis of data from the Global Burden of Disease Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), 19071918. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6.

De Prado Bert, P., Mercader, E. M. H., Pujol, J., Sunyer, J., & Mortamais, M. (2018). The effects of air pollution on the brain: A review of studies interfacing environmental epidemiology and neuroimaging. *Current Environmental Health Reports*, *5*(3), 351–364. https://doi.org/10.1007/s40572-018-0209-9

Department for Environment, Food & Rural Affairs. (2023). *Air pollution in the UK 2023*. https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/annualreport/air_pollution_uk_2023_issue_1.pdf

Environmental Protection Agency [EPA]. (2024). *Particle pollution and your patients' health*. https://www.epa.gov/pmcourse/particle-pollution-and-respiratory-effects

European Environment Agency. (2024). *Air quality in Europe – 2024 report* (EEA Report No. 12/2024). Publications Office of the European Union.

Fuller, R., Landrigan, P. J., Balakrishnan, K., Bathan, G., Bose-O'Reilly, S., Brauer, M., Caravanos, J., Chiles, T., Cohen, A., Corra, L., Cropper, M., Ferraro, G., Hanna, J., Hanrahan, D., Hu, H., Hunter, D., Janata, G., Kupka, R., Lanphear, B., … Yan, C. (2022). Pollution and health: A progress update. *The Lancet Planetary Health*, *6*(6), e535–e547. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00090-0

Glencross, D. A., Ho, T. R., Camiña, N., Hawrylowicz, C. M., & Pfeffer, P. E. (2020). Air pollution and its effects on the immune system. *Free Radical Biology & Medicine*. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2020.01.179

Goldizen, F. C., Sly, P. D., & Knibbs, L. D. (2016). Respiratory effects of air pollution on children. *Pediatric Pulmonology*, *51*. https://doi.org/10.1002/ppul.23262

Grigorieva, E., & Lukyanets, A. (2021). Combined effect of hot weather and outdoor air pollution on respiratory health: Literature review. *Atmosphere*. https://doi.org/10.3390/atmos12060790

Hamanaka, R. B., & Mutlu, G. M. (2018). Particulate matter air pollution: Effects on the cardiovascular system. *Frontiers in Endocrinology*, *9*, Article 680.

Humas RSUD dr. Iskak Tulungagung. (2023, September 17). *Paparan polusi udara naikkan penyakit respirasi*. RSUD dr. Iskak Tulungagung. https://rsud.tulungagung.go.id/paparan-polusi-udara-naikkan-penyakit-respirasi/

Kelly, F. J., & Fussell, J. C. (2015). Air pollution and public health: Emerging hazards and improved understanding of risk. *Environmental Geochemistry and Health*, *37*(4), 631–649.

Kementerian Kesehatan Republik Indonesia [Kemenkes RI]. (2023). *Dampak polusi udara*. https://perpustakaan.kemkes.go.id/wp-content/uploads/2023/06/Kemenkes-RI-Polusi-Udara.pdf

Kim, J. S., Shin, A., Lee, H. Y., Lim, Y. H., & Kim, H. (2019). Association of air pollution with increased incidence of ventricular tachyarrhythmias recorded by implantable cardioverter defibrillators: Vulnerable patients to air pollution. *International Journal of Cardiology*, *295*, 43–48.

Kurniawati, I. D. (2017). *Indikator pencemaran udara berdasarkan jumlah kendaraan dan kondisi iklim (Studi di wilayah Terminal Mangkang dan Terminal Penggaron Semarang)* [Skripsi, Universitas Muhammadiyah Semarang]. Universitas Muhammadiyah Semarang Repository. http://repository.unimus.ac.id/id/eprint/1044

Kusminingrum, N. (2007). Peranan tanaman semak dalam upaya mengurangi polutan NO_x dan CO. *Jurnal Jalan dan Jembatan*, *24*(3).

Lederer, D. J., Martinez, F. J., Christenson, S. A., Raghu, G., Paine, R., Bender, B., Comhair, S. A., Crystal, R. G., Diaz, P. T., Fine, A., Gladwin, M. T., Goldstein, D. R., Hershenson, M. B., Iribarren, C., Kadri, S. S., Lloyd, E. E., Lutz, S. M., & Wong, H. (2021). Air pollution and lung health. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, *204*(8), 876–878.

Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Pöschl, U., Fnais, M., Daiber, A., & Münzel, T. (2019). Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. *European*, *40*(20), 1590–1596.

Li, N., Georas, S., Alexis, N., Fritz, P., Xia, T., Williams, M. A., Horner, E., & Nel, A. (2018). Ambient fine particulate matter induces oxidative stress and pro-inflammatory response via up-regulating the expression of CYP1A1/1B1 in human bronchial epithelial cells. *Toxicology*, *395*, 11–19.

Lopuszanska, U., & Samardakiewicz, M. (2020). The relationship between air pollution and cognitive functions in children and adolescents: A systematic review. *Cognitive and Behavioral Neurology*, *33*(3), 157–178. https://doi.org/10.1097/WNN.0000000000000235

Marino, E., Caruso, M., Campagna, D., & Polosa, R. (2015). Impact of air quality on lung health: Myth or reality? *Therapeutic Advances in Chronic Disease*, *6*, 286–298. https://doi.org/10.1177/2040622315587256

Maung, T., Bishop, J., Holt, E., Turner, A., & Pfrang, C. (2022). Indoor air pollution and the health of vulnerable groups: A systematic review focused on particulate matter (PM), volatile organic compounds (VOCs) and their effects on children and people with pre-existing lung disease. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*. https://doi.org/10.3390/ijerph19148752

Mohan, V. (2016, June 6). *1.6 million premature deaths in India linked to air pollution*. The Times of India. https://timesofindia.indiatimes.com/life-style/health-fitness/health-news/1-6-million-premature-deaths-in-india-linked-to-air-pollution/articleshow/52950377.cms

Niehoff, N. M., Terry, M. B., Bookwalter, D. B., Kaufman, J. D., O'Brien, K. M., Sandler, D. P., & White, A. J. (2022). Air pollution and breast cancer: An examination of modification by underlying familial breast cancer risk. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, *31*(2), 422–429. https://doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-21-1140

Paulin, L., & Hansel, N. (2016). Particulate air pollution and impaired lung function. *F1000Research*, *5*. https://doi.org/10.12688/f1000research.7108.1

Pieters, N., Plusquin, M., Cox, B., Kicinski, M., Vangronsveld, J., & Nawrot, T. S. (2012). [Judul dan sumber publikasi belum lengkap — mohon dikonfirmasi ke penulis].

Raaschou-Nielsen, O., Beelen, R., Wang, M., Hoek, G., Andersen, Z. J., Hoffmann, B. & Vineis, P. (2021). Particulate matter air pollution components and risk for lung cancer. *Environment International*, *87*, 66–73.

Rao, X., Patel, P., Puett, R., & Rajagopalan, S. (2015). Air pollution as a risk factor for type 2 diabetes. *Toxicology Sciences*, *143*(2), 231–241.

Respiratory Health Association. (2024). *Understanding air pollution*. https://resphealth.org/clean-air/understanding-air-pollution/

Restu, A. (2023, August 21). *4 jenis penyakit jantung ini bisa muncul gegara polusi udara*. CNBC Indonesia. https://www.cnbcindonesia.com/lifestyle/20230821104710-36-464587/4-jenis-penyakit-jantung-ini-bisa-muncul-gegara-polusi-udara

Royal College of Physicians. (2016). *Every breath we take: The lifelong impact of air pollution*. https://www.rcp.ac.uk/projects/outputs/every-breath-we-take-lifelong-impact-air-pollution

Schraufnagel, D. E., Balmes, J. R., Cowl, C. T., De Matteis, S., Jung, S. H., Mortimer, K., Perez-Padilla, R., Rice, M. B., Riojas-Rodriguez, H., Sood, A., Thurston, G. D., To, T., Vanker, A., & Wuebbles, D. J. (2019). Air pollution and noncommunicable diseases: A review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee, Part 1: The damaging effects of air pollution. *Chest*, *155*(2), 409–416.

Seaton, A., Godden, D., Macnee, W., & Donaldson, K. (2015). Particulate air pollution and acute health effects. *The Lancet*, *345*, 176–178. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(95)90173-6

Suiraoka, I. P. (2012). *Penyakit degeneratif*. Nuha Medika.

Sukmawati, I. R. (2023). Hubungan polusi udara dengan kejadian penyakit kardiovaskular. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, *9*(1), 23–30.

Sun, Q., Yue, P., Deiuliis, J. A., Lumeng, C. N., Kampfrath, T., Mikolaj, M. B., Cai, Y., Ostrowski, M. C., Lu, B., Parthasarathy, S., Brook, R. D., Moffatt-Bruce, S. D., Chen, L. C., & Rajagopalan, S. (2009). Cardiovascular effects of air pollution: What to expect. *Circulation*, *119*(21), 2340–2347.

Suwa, T., Hogg, J. C., Quinlan, K. B., Ohgami, A., Vincent, R., & van Eeden, S. F. (2002). Particulate air pollution induces progression of atherosclerosis. *Journal of the American College of Cardiology*, *39*(6), 935–942.

Tiotiu, A. I., Novakova, P., Nedeva, D., Chong-Neto, H. J., Novakova, S., Steiropoulos, P., & Kowal, K. (2020). Impact of air pollution on asthma outcomes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*. https://doi.org/10.3390/ijerph17176212

Turner, M. C., Andersen, Z. J., Baccarelli, A., Diver, W. R., Gapstur, S. M., Pope, C. A., [nama penulis lain belum lengkap — mohon dikonfirmasi], & Thurston, G. (2020). Outdoor air pollution and cancer: An overview of the current evidence and public health recommendations. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, *70*(6), 460–479.

United Nations Children's Fund [UNICEF]. (2024, June 18). *Air pollution accounted for 8.1 million deaths globally in 2021*. https://www.unicef.org/press-releases/air-pollution-accounted-81-million-deaths-globally-2021-becoming-second-leading-risk

United Nations Environment Programme [UNEP]. (2019). *Air pollution: World's worst environmental health risk*.

World Bank. (2021). *PM2.5 air pollution, mean annual exposure (micrograms per cubic meter) – China*. Retrieved July 2026, from https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.PM25.MC.M3?locations=CN

World Health Organization [WHO]. (2018). *Indoor air pollution: National burden of disease estimates*.

World Health Organization [WHO]. (2019). *World health statistics 2019: Monitoring health for the SDGs, sustainable development goals*. https://www.who.int/publications/i/item/9789241565707

World Health Organization [WHO]. (2021). *Air pollution*. https://www.who.int/health-topics/air-pollution

World Health Organization [WHO]. (2022). *Ambient (outdoor) air quality and health*. https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-energy-and-health

World Health Organization [WHO]. (2023). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*.

World Health Organization [WHO]. (2024). *Health consequences of air pollution on populations*. https://www.who.int/news/item/25-06-2024-what-are-health-consequences-of-air-pollution-on-populations

Xing, Y. F., Xu, Y. H., Shi, M. H., & Lian, Y. X. (2016). The impact of $PM_{2.5}$ on the human respiratory system. *Journal of Thoracic Disease*, *8*(1), E69–E74. https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.19

Zhang, Z., Guo, C., Lau, A. K. H., Chan, T. C., Chuang, Y. C., Lin, C., Jiang, W. K., Yeoh, E. K., Tam, T., Woo, K. S., Yan, B. P., Chang, L. Y., Wong, M. C. S., & Lao, X. Q. (2018). Long-term exposure to fine particulate matter, blood pressure, and incident hypertension in Taiwanese adults. *Environmental Health Perspectives*, 126(1), Article 017008. https://doi.org/10.1289/EHP2466

.

Bab VIII
Transboundary Haze Pollution

Atep Radiana dan Amalia Nurlatifah

Kebakaran hutan dan lahan terjadi ketika hutan atau vegetasi terbakar tanpa kendali atau perencanaan mengakibatkan kerusakan lingkungan dan emisi polusi udara yang merusak, termasuk dampaknya terhadap penurunan kualitas udara. Penyebabnya bermacam-macam, termasuk pembakaran oleh manusia dan kekeringan ekstrem, yang berdampak pada kerugian properti, penurunan kesehatan masyarakat, kerugian ekonomi, dan ketidakstabilan sosial (Brown & Davis 1973).

Dispersi adalah fenomena yang melibatkan penyebaran suatu zat atau energi dan memiliki dampak signifikan. Salah satu kasus yang fenomenal adalah pencemaran udara akibat kebakaran hutan, yang tidak hanya menurunkan kualitas udara secara umum, tetapi juga berdampak langsung terhadap kesehatan

A. Radiana & A. Nurlatifah
Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: atep001@brin.go.id

© 2026 Editor & Penulis

Radiana, A. & Nurlatifah, A. (2026). *Transboundary Haze Pollution.* Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (149–177). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1812
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

manusia, salah satunya gangguan pernapasan. Selain itu, dispersi ini menyebabkan penurunan jarak pandang (visibilitas), yakni ketidakmampuan melihat objek yang jelas terlihat dengan mata telanjang, bahkan hingga menghentikan kegiatan ekonomi dan aktivitas sehari-hari akibat kondisi udara yang berbahaya. Lebih serius lagi, *transboundary pollution*—polutan yang menyebar jauh melintasi batas negara—turut mencemari wilayah negara tetangga.

Transboundary haze pollution atau polusi kabut asap lintas batas adalah kabut asap yang disebabkan oleh asap dari kebakaran lahan di satu negara dan menyebar melintasi batas negara sehingga memengaruhi negara lain (Laing & Weger, 2020; Mubariak & Sundstrom, 2016). Asap ini mengandung partikel berbahaya, seperti $PM_{2.5}$, yang menyebabkan masalah kesehatan pernapasan serius, iritasi mata, dan bahkan kematian (Rhee & Baik, 2017).

A. Penyebab Dan Dampak *Transboundary Haze Pollution*

Transboundary air pollution disebabkan oleh beberapa faktor, baik berkaitan dengan aktivitas manusia maupun faktor alam. Faktor utama penyebab adanya *transboundary haze pollution* adalah kebakaran hutan dan lahan. Faktor-faktor lain yang dapat menyebabkan *transboundary air pollution*, termasuk *haze pollution* di antaranya adalah praktik pembakaran terbuka, kawasan industri dan pembangkit listrik, badai pasir, dan letusan gunung api.

Kebakaran hutan dan lahan adalah penyebab utama dari *transboundary haze pollution*. Kebakaran ini sering kali disebabkan oleh aktivitas manusia seperti pembukaan lahan untuk pertanian, perkebunan, atau pembangunan infrastruktur. Selain itu, faktor alam seperti kekeringan juga dapat memicu kebakaran hutan dan lahan (Laing & Weger, 2020; Mubariak & Sundstrom, 2016). Perubahan iklim dapat meningkatkan risiko kebakaran hutan dan lahan. Hal ini dapat memperburuk masalah *transboundary haze pollution* di beberapa wilayah (Mubariak & Sundstrom, 2016).

Praktik pembakaran terbuka pun dapat menyebabkan *haze pollution*, terutama untuk membersihkan lahan pertanian atau lahan gambut yang terdegradasi juga dapat menyebabkan emisi asap yang besar. Pembakaran ini sering kali tidak terkontrol dan dapat menghasilkan jumlah asap yang signifikan (Rhee & Baik, 2017).

Faktor-faktor lain yang berkontribusi terhadap kejadian kebakaran hutan dan lahan yang luas dan berpotensi menyebabkan *transboundary haze pollution* di antaranya adalah lemahnya penegakan hukum terhadap pembakaran lahan ilegal, kurangnya kesadaran masyarakat tentang bahaya polusi kabut asap, serta keterbatasan sumber daya untuk pencegahan dan penanggulangan kebakaran lahan.

Emisi dari industri dan pembangkit listrik dapat menjadi kontributor penting terhadap *transboundary air pollution*. Pembakaran bahan bakar fosil dan proses industri lainnya menghasilkan emisi polutan yang menyumbang pencemaran udara (Laing & Weger, 2020). Selain itu, kendaraan bermotor juga merupakan sumber emisi utama yang dapat menyebabkan polusi udara.

Emisi dari kendaraan, terutama kendaraan diesel, meliputi partikel halus dan gas polutan berkontribusi terhadap *transboundary air pollution*. Faktor terakhir adalah letusan gunung api. Letusan gunung api, meskipun tidak seumum kebakaran hutan dan lahan, dapat menyebabkan *transboundary haze pollution* dari pelepasan material vulkanik ke atmosfer. Material vulkanik tersebut yang dapat menyebar ke wilayah yang jauh.

Transboundary haze pollution atau polusi kabut asap lintas batas memiliki dampak yang luas dan merugikan, tidak hanya bagi kesehatan manusia, tetapi juga bagi perekonomian dan lingkungan hidup. Kabut asap (*haze*) dapat menyebabkan gangguan pernapasan, seperti iritasi tenggorokan, batuk, dan kesulitan bernapas. Partikel-partikel berbahaya seperti $PM_{2.5}$ yang terdapat dalam asap dapat masuk ke saluran pernapasan dan menyebabkan berbagai masalah kesehatan, termasuk infeksi saluran pernapasan akut (ISPA), asma,

bronkitis, dan penyakit paru obstruktif kronis (PPOK). Kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan penderita penyakit pernapasan sebelumnya akan lebih terdampak (Rhee & Baik, 2017). Selain itu, paparan asap dalam jangka panjang juga dapat meningkatkan risiko penyakit jantung koroner dan kanker paru-paru (AATP, 2002).

Polusi kabut asap lintas batas juga dapat mengganggu destinasi wisata yang mengakibatkan tempat wisata menjadi tidak menarik yang otomatis mengurangi jumlah wisatawan. Sementara itu, aktivitas bisnis juga terganggu oleh polusi udara yang parah. Gangguan tersebut berupa berkurangnya produktivitas pekerja dan terhambatnya kegiatan transportasi.

Sektor pertanian juga mengalami kerugian akibat kerusakan tanaman yang disebabkan oleh asap. Kebakaran hutan dan lahan dapat merusak habitat hewan dan tumbuhan, mengancam keanekaragaman hayati, dan mengganggu siklus air dan nutrisi dalam ekosistem. Selain itu, kebakaran hutan dan lahan yang menjadi sumber asap juga dapat mempercepat perubahan iklim karena pelepasan gas rumah kaca (Sok et al., 2024).

Transboundary haze pollution dapat memicu ketegangan politik dan diplomatik antara negara-negara tetangga Indonesia yang terkena dampak, seperti Singapura, Malaysia, dan Brunei Darussalam. Hal ini dapat terjadi karena negara-negara tersebut merasa dirugikan oleh kabut asap yang berasal dari Indonesia. Namun demikian, *transboundary haze pollution* telah mendorong negara-negara ASEAN untuk meningkatkan kerja sama regional dalam bidang pencegahan dan penanggulangan kebakaran hutan dan lahan. Hal ini telah menghasilkan berbagai perjanjian dan inisiatif regional, seperti *ASEAN Agreement on Transboundary Haze Pollution* (AATHP).

Dengan memahami kejadian *transboundary haze pollution*, langkah-langkah pengendalian untuk mengurangi risiko dapat berupa pengelolaan hutan yang berkelanjutan oleh pemerintah dan masyarakat guna mencegah kebakaran hutan dan lahan. Sementara itu, lembaga terkait bertugas mengawasi praktik pembakaran terbuka

guna mengurangi polusi udara lintas batas, termasuk industri yang mengembangkan teknologi pengendalian polusi. Industri semacam itu bertujuan agar emisi gas buang dapat ditekan sementara pemerintah mendorong transportasi berkelanjutan sebagai upaya mengurangi dampak pencemaran udara.

Di tingkat regional, negara-negara ASEAN melakukan mitigasi perubahan iklim demi mencapai lingkungan bebas polusi. Hal itu sejalan dengan tujuan bersama untuk menanggulangi *transboundary haze pollution* secara efektif.

Pemerintah Indonesia menerapkan berbagai program untuk mendukung keberlanjutan lingkungan. Salah satunya adalah program Kesatuan Pengelolaan Hutan (KPH) yang bertujuan memastikan kawasan hutan tetap produktif tanpa merusak ekosistem. Selain itu, terdapat pula program Pengendalian Kebakaran Hutan dan Lahan (DALKARHUTLA) yang menyediakan data dan informasi terkini untuk pencegahan kebakaran hutan. Melalui program DALKARHUTLA, pemerintah mengawasi praktik pembakaran terbuka.

Pemerintah juga mempromosikan transportasi berkelanjutan dengan berbagai kebijakan dan insentif untuk mengurangi dampak lingkungan. Sementara itu, ada pula program mitigasi perubahan iklim di Indoensia. Program tersebut berkomitmen menjaga keseimbangan antara pembangunan dan kelestarian lingkungan untuk menurunkan emisi gas rumah kaca dari sektor kehutanan dan penggunaan lahan dengan memastikan tingkat serapan karbon lebih tinggi daripada tingkat emisi pada tahun 2030 (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan [KLHK], 2022). Program ini merupakan bagian dari komitmen Indonesia dalam mengurangi dampak perubahan iklim global dan mendukung target penurunan emisi nasional.

B. Kebakaran Hutan dan Lahan di Indonesia

Beberapa kejadian kebakaran hutan dan lahan di Indonesia telah menyebabkan kejadian *transboundary haze pollution*. Negara tetangga, terutama Malaysia dan Singapura, sering mengeluhkan

kejadian ini. Kebakaran hutan dan lahan di Indonesia terjadi hampir setiap musim kemarau, tetapi tidak setiap tahun kejadian kebakaran hutan menghasilkan fenomena *transboundary haze pollution*. Berikut ini beberapa kejadian kebakaran hutan yang telah menyebabkan *transboundary haze pollution* ke negara tetangga.

1. Kebakaran Hutan pada Tahun 1982–1983

Sejarah mencatat bahwa pada tahun 1982, kebakaran hutan terbesar terjadi di Kalimantan Timur. Beberapa pihak menyatakan bahwa kebakaran ini terjadi akibat kelalaian dalam pengelolaan hutan dan adanya fenomena iklim El Nino. Fenomena iklim El Nino menyebabkan kekeringan parah antara Juni 1982 dan Mei 1983.

Salah satu pemicunya adalah adanya aktivitas ladang berpindah yang dilakukan masyarakat dengan membakar lahan baru untuk wilayah perkebunan tanaman semusim, seperti padi, ubi, dan jagung. Selain itu, aktivitas pembalakan liar yang menghasilkan akumulasi limbah pembalakan juga turut menjadi penyebab munculnya titik kebakaran hutan.

Akumulasi limbah ini kemudian banyak ditumbuhi oleh lapisan vegetasi yang lebih padat dan mudah terbakar dibandingkan lapisan penutup tanah yang tidak begitu rapat. Kebakaran yang terjadi pada tahun ini telah menghanguskan lahan seluas 3,2 juta ha di wilayah Kalimantan Timur, dengan 2,7 juta ha di antaranya merupakan hutan hujan tropis. Di luar kerugian ekonominya, kabut asap dari kebakaran hutan pada tahun tersebut juga menghambat aktivitas transportasi, baik jalur darat maupun udara, di negara-negara tetangga seperti Malaysia dan Singapura (Tempo.co, 2023).

2. Kebakaran Hutan pada Tahun 1997–1998

Setelah kebakaran hutan yang melanda pada tahun 1982–1983, kebakaran hutan besar terjadi kembali pada tahun 1997–1998 yang menghanguskan lebih dari 10 juta ha lahan di Indonesia. Kebakaran hutan pada tahun ini juga termasuk yang terparah di dunia. Kerugian ekonomi yang tercatat akibat bencana ini mencapai 10 miliar dolar.

Sama seperti peristiwa kebakaran hutan pada tahun 1982–1983, kabut asap dirasakan hingga ke negara-negara tetangga di Asia Tenggara. Sebagai contoh, pada kurun waktu 1997–1998, tepatnya pada bulan Agustus hingga Oktober, Singapura dan Malaysia terselimuti kabut asap akibat adanya angin yang membawa asap ke arah barat dan utara dari langit Indonesia.

Kabut asap yang menyelimuti langit ini membuat *Air Pollution Index* (API) mencapai level yang berbahaya (hingga 849). Fenomena El Nino pada era ini menjadi salah satu penyebab titik kebakaran terjadi yang kemudian tersulut oleh adanya tindakan lalai dari beberapa oknum yang tidak bertanggung jawab dalam membuka lahan.

Hasil citra satelit kelapa sawit memperlihatkan tidak terkendalinya kebakaran sehingga mencapai areal hutan di sekitarnya, termasuk rawa gambut dan berbagai lahan pertanian. Luasan area yang terbakar menyebabkan hujan tidak mampu memadamkan api. Bahkan, negara Indonesia mendapatkan bantuan dari negara lain seperti pesawat pemadam dan sumber daya manusia dari berbagai negara.

Pemerintah pusat dan daerah melakukan berbagai antisipasi pencegahan berupa pelarangan melakukan aktivitas industri perkebunan. Hal itu bertujuan untuk menghentikan pembalakan liar sekaligus menurunkan jumlah titik-titik kebakaran (Instruksi Presiden Nomor 8 Tahun 2015).

3. Kebakaran Hutan pada Tahun 2006

Berbeda dengan peristiwa kebakaran hutan pada tahun-tahun sebelumnya yang diperparah oleh fenomena El Nino, peristiwa kebakaran hutan pada tahun 2006 terekam cukup rendah dari pengaruh fenomena El Nino. Faktanya, aktivitas pembakaran lahan yang tidak terkendali pada tahun 2006 tersebut disebabkan oleh pembukaan lahan untuk keperluan pertanian.

Lebih dari 3 juta ha lahan telah terbakar dan memicu terjadinya polusi udara yang levelnya berhasil terekam melalui instrumen

NASA yang disebut *Measurements of Pollution in the Troposphere* (MOPITT). Instrumen ini berhasil melacak level karbon monoksida di atmosfer yang menjadi salah satu indikator utama adanya polusi udara. Selain gas karbon monoksida, gas karbon dioksida juga menjadi salah satu gas yang banyak diproduksi akibat kebakaran hutan dan lahan.

Kebakaran hutan di Indonesia turut menempatkan negara ini sebagai salah satu penyumbang gas rumah kaca terbesar ketiga di dunia, dengan emisi karbon dioksida yang diperkirakan mencapai sekitar 2 miliar ton akibat karhutla (Tempo.co, 2023). Tingginya emisi gas rumah kaca ini dikhawatirkan berdampak pada perubahan iklim dalam jangka panjang.

4. Kebakaran Hutan pada Tahun 2015

Lebih dari 2,6 juta ha lahan di Indonesia telah terbakar sepanjang tahun 2015. Kebakaran melanda tidak hanya di wilayah Sumatra dan Kalimantan saja, tetapi juga di 29 provinsi lainnya, kecuali DKI Jakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta, dan Kepulauan Riau.

Kalimantan Tengah menjadi area terparah, yaitu area dengan titik kebakaran hutan terbanyak dibandingkan area-area lainnya. Faktor aktivitas manusia tetap menjadi penyebab utama kebakaran. Hal ini terlihat dari mayoritas titik kebakaran yang bermula dari areal Hutan Tanaman Industri, sementara kondisi perkebunan yang kering di musim kemarau semakin memudahkan api untuk menghanguskan segalanya. Fenomena El Nino yang menurunkan intensitas curah hujan juga semakin memperparah bencana kebakaran hutan yang terjadi.

Hangusnya lahan akibat dilalap api menyebabkan hilangnya habitat orang utan dan beberapa spesies yang terancam punah lainnya. Kerugian yang berhubungan dengan lingkungan dan ekosistem ini mencapai 295 juta dolar, sedangkan kerugian ekonomi yang ditimbulkan akibat kebakaran ini mencapai 16 miliar dolar. Tidak hanya itu, seperti yang telah terjadi sebelum-sebelumnya,

emisi gas karbon dioksida di atmosfer juga meningkat sebanyak lebih dari 15,95 juta ton per harinya.

Sebuah studi yang dilakukan oleh ilmuwan dari Belanda, Inggris, dan Indonesia menyatakan bahwa sebanyak 97% dari total gas karbon dioksida yang dilepaskan ke atmosfer pada 2015 berasal dari hasil kebakaran hutan dan lahan di Indonesia. Hasil riset juga menunjukkan bahwa emisi karbon dioksida pada tahun ini jauh lebih besar dibandingkan pada tahun 1997 (Huijnen et al., 2016).

5. Kebakaran Hutan pada Tahun 2019

Kebakaran hutan yang melanda pada 2019 menyebabkan hangusnya lebih dari 850 ribu ha lahan. Data dari *Global Forest Watch* menunjukkan bahwa sebanyak 42% dari total area yang terbakar merupakan lahan gambut (Haniy et al., 2019).

Kebakaran yang terjadi di lahan gambut biasanya sulit untuk dipadamkan karena material organik yang berada di dalam gambut menyebabkan api menjadi lebih besar dan menghasilkan banyak kabut asap. Terbakarnya lahan gambut ini juga menimbulkan problematika iklim jangka panjang, karena satu hektar lahan gambut yang terbakar setara dengan pelepasan 55 metrik ton karbon dioksida per tahun. Kalimantan Tengah menjadi salah satu area yang paling banyak mengalami kebakaran hutan, mengingat area ini didominasi oleh lahan gambut.

Aktivitas pembukaan lahan dengan membakar lahan untuk kebutuhan perkebunan, terutama kelapa sawit, tetap merajalela pada tahun ini sehingga tidak mampu menahan terjadinya kebakaran hutan di Indonesia. Perubahan indeks vegetasi wilayah Kalimantan Tengah pada tahun 2019 terlihat lebih signifikan dibandingkan pada tahun-tahun sebelumnya. Hal ini karena pada tahun 2019, Provinsi Kalimantan Tengah merupakan provinsi dengan area kebakaran terluas di Indonesia.

Mayoritas area yang terbakar, sebanyak 70%-nya berasal dari lahan gambut yang telah terdegradasi. Akibatnya, 708 juta ton gas rumah kaca yang didominasi oleh karbon dioksida dirilis ke atmosfer. Banyaknya kandungan gas rumah kaca di atmosfer menjadi

salah satu pemicu terjadinya pemanasan global yang berakhir pada peristiwa perubahan iklim. Perubahan iklim ini nantinya tidak hanya akan memengaruhi siklus cuaca di bumi, tetapi juga dapat mengubah ekosistem yang menjadi habitat berbagai spesies hewan dan tanaman yang mulai langka.

Dari pemaparan kasus kebakaran hutan terbesar yang pernah terjadi di Indonesia, dapat terlihat bahwa mayoritas kebakaran hutan di negara ini disebabkan oleh faktor antropogenik atau adanya campur tangan manusia. Namun, tidak dapat dipungkiri bahwa fenomena El Nino juga turut memperparah kondisi kebakaran hutan yang terjadi. Selain itu, kondisi tanah yang didominasi oleh lahan gambut juga menyebabkan hutan dan lahan menjadi lebih rentan terkena kebakaran di berbagai wilayah di Indonesia. Adanya kebijakan yang bijaksana mengenai pengelolaan hutan dan lahan gambut dipandang dapat membantu mengatasi masalah kebakaran hutan yang sering terjadi di negara ini ((Haniy et al., 2019).

C. Metode Pembuktian Kejadian *Transboundary Haze*

Kasus *transboundary pollution* sering menjadi masalah dalam hubungan antarnegara. Suatu negara menuduh negara tetangganya mengirimkan polutan udara, sementara negara yang dituduh tidak mengakui hal tersebut. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode untuk membuktikan ada atau tidaknya kejadian *transboundary pollution*.

Membuktikan kejadian *transboundary*, seperti kabut asap yang melintasi batas negara, memerlukan kombinasi metode yang akurat dan terverifikasi. Metode yang umum digunakan adalah model, satelit, dan LIDAR.

1. Metode Berbasis Model

Model simulasi atmosfer seperti WRF-Chem (*Weather Research and Forecasting-Chemistry*) digunakan untuk memprediksi pergerakan kabut asap dan konsentrasi polutannya. Model ini mempertimbang-

kan faktor meteorologi seperti angin, suhu, dan kelembapan, serta emisi polutan dari sumber-sumbernya (Chakraborty et al., 2015).

WRF-Chem merupakan model atmosfer canggih yang dikembangkan oleh *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) Amerika Serikat. Model ini dirancang untuk menyimulasikan berbagai proses atmosfer, termasuk pergerakan udara, emisi polutan, transformasi kimia, dan deposisi polutan.

Model inversi menggunakan data pengamatan kualitas udara untuk memperkirakan emisi polutan dari sumbernya. Model ini membantu mengidentifikasi lokasi dan intensitas kebakaran hutan dan lahan yang berkontribusi terhadap kabut asap *transboundary*.

Dalam dunia penelusuran sumber pencemaran udara, model inversi memegang peranan penting. Berbeda dengan model atmosfer seperti WRF-Chem yang memprediksi pergerakan polutan, model inversi bekerja dengan "kebalikannya". Model ini menganalisis data konsentrasi polutan yang terukur di udara untuk mencari tahu sumber emisinya.

Selain model simulasi atmosfer dan model inversi, model lain yang dapat digunakan adalah model trayektori. Dalam dunia meteorologi dan ilmu lingkungan, model trayektori berperan penting dalam melacak pergerakan polutan, debu, gas, dan partikel lain di atmosfer. Model ini bekerja dengan prinsip bagaimana partikel berpindah dari sumbernya ke tempat lain. Hal ini berguna untuk berbagai keperluan, seperti mempelajari penyebaran polusi udara, mengelola dampak bencana, dan meneliti transportasi zat di atmosfer. Salah satu contoh model trayektori ini, misalnya adalah HYSPLIT (Stein et al., 2015).

2. Metode Berbasis Satelit dan LIDAR

Di era modern, sensor multi-spektrum seperti MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) dan VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) seperti mata dari langit yang membantu manusia memantau bumi dari berbagai aspek. Sensor ini menghasilkan gambar dengan resolusi spasial tinggi dan menangkap berbagai

panjang gelombang cahaya. Dengan kemampuan seperti itu, sensor dapat mendeteksi asap, api, dan perubahan tutupan lahan dengan tingkat presisi yang luar biasa.

Sensor ini mampu mendeteksi asap dan api dengan menganalisis sinyal cahaya yang dipantulkan dari permukaan bumi. Asap dan api memiliki karakteristik spektral yang berbeda dari vegetasi dan permukaan lainnya, sehingga sensor dapat mengidentifikasi dan memetakan lokasi asap dan api.

Data satelit dari sensor multi-spektrum digunakan untuk memetakan lokasi dan luas kebakaran hutan dan lahan. Informasi ini sangat penting untuk membantu otoritas terkait dalam mengupayakan pemadaman api, manajemen darurat, dan menganalisis risiko kebakaran di masa depan. Sensor ini dapat melacak pergerakan kabut asap dengan menganalisis gambar satelit yang diambil secara berkala. Informasi ini penting untuk memprediksi dampak kabut asap terhadap kualitas udara di berbagai wilayah dan membantu masyarakat dalam mengambil tindakan pencegahan. Sensor multi-spektrum juga digunakan untuk memantau perubahan tutupan lahan, seperti deforestasi dan penggurunan. Informasi ini diperlukan untuk memahami dampak manusia terhadap lingkungan dan untuk mendukung upaya pelestarian alam.

Berdasarkan penjelasan di atas, sensor multi-spektrum seperti MODIS dan VIIRS memberikan informasi tentang lokasi dan luas kabut asap. Lain halnya dengan sensor lidar seperti CALIPSO (*Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations*). Sensor jenis ini merupakan teropong laser yang menembus kabut asap dan memberikan informasi vertikal tentang profilnya, seperti melihat ke dalam lapisan asap. Dengan demikian, sensor lidar seperti CALIPSO memberikan informasi tambahan berupa profil vertikal, yang tidak dapat diperoleh dari sensor multi-spektrum

Sensor lidar memancarkan sinar laser ke atmosfer dan mengukur waktu yang dibutuhkan untuk kembali setelah terpantul dari partikel kabut asap. Data ini memungkinkan sensor untuk membuat profil vertikal kabut asap, termasuk ketinggian, ketebalan, dan konsentrasi polutan di berbagai lapisan atmosfer.

Data lidar dari CALIPSO juga digunakan untuk memvalidasi model atmosfer seperti WRF-Chem yang dibahas sebelumnya. Dengan membandingkan data simulasi model dengan data pengukuran lidar, para ilmuwan dapat meningkatkan akurasi model dan mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang proses atmosfer yang terkait dengan kabut asap.

Informasi vertikal tentang profil kabut asap dari lidar membantu para ilmuwan untuk memahami dampak kabut asap pada kualitas udara dengan lebih detail. Data ini dapat digunakan untuk mempelajari bagaimana kabut asap memengaruhi kesehatan manusia, visibilitas, dan iklim regional. Data lidar juga dapat digunakan untuk mempelajari bagaimana kabut asap memengaruhi sistem pernapasan manusia. Dengan mengetahui konsentrasi polutan di berbagai ketinggian, para ilmuwan dapat memahami bagaimana kabut asap terhirup dan berdampak pada kesehatan.

Informasi profil vertikal kabut asap dari lidar dapat digunakan untuk memprediksi kualitas udara di berbagai ketinggian. Hal ini membantu masyarakat untuk mengetahui tingkat paparan polutan di tempat mereka tinggal dan mengambil langkah-langkah pencegahan yang diperlukan. Data lidar digunakan untuk mempelajari bagaimana kabut asap bergerak dan tercampur di atmosfer. Informasi ini dibutuhkan untuk memahami bagaimana kabut asap dapat berpindah ke wilayah lain dan memengaruhi kualitas udara di sana.

3. Kombinasi Metode

Penggunaan kombinasi metode berbasis model dan satelit memberikan gambaran yang lebih lengkap dan akurat tentang kejadian *transboundary haze*. Model atmosfer membantu memprediksi pergerakan dan konsentrasi kabut asap, sedangkan data satelit memberikan informasi spasial dan temporal yang detail tentang lokasi, luas, dan intensitas kebakaran hutan dan lahan, serta pergerakan kabut asap.

D. Upaya Penanggulangan *Transboundary Haze Pollution*

1. Negara yang Terlibat dalam Penaggulangan *Transboundary Haze Pollution*

Transboundary haze pollution merupakan masalah lingkungan serius di kawasan Asia Tenggara dan sekitarnya. Masalah ini terjadi akibat kebakaran hutan dan lahan yang meluas, yang dipicu oleh aktivitas manusia seperti pembukaan lahan untuk pertanian, perkebunan, dan aktivitas industri. Selain itu, faktor alam seperti kekeringan ekstrem memperburuk kondisi ini.

Sumber utama asap di Indonesia berasal dari Pulau Sumatra dan Kalimantan, terutama saat musim kemarau. Asap dari wilayah ini kemudian terbawa angin dan menyebar ke negara-negara tetangga sebagai berikut.

a. Singapura: Negara pulau ini terletak di selatan Kepulauan Riau, Indonesia, dan sering menerima asap dari kebakaran lahan di Sumatra dan Kalimantan.
b. Malaysia: Semenanjung Malaysia, terutama bagian barat, juga sering terpapar kabut asap lintas batas dari Sumatra dan Kalimantan.
c. Brunei Darussalam: Negara kecil ini terletak di Pulau Kalimantan dan sering terkena dampak kabut asap dari kebakaran lahan di Indonesia.
d. Thailand: Bagian selatan Thailand, terutama wilayah perbatasan dengan Malaysia, juga dapat terpapar kabut asap lintas batas.

Konektivitas geografis dan penyebaran polusi udara menjadi faktor penting dalam pemahaman dan penanggulangan *transboundary haze pollution*. Kawasan Asia Tenggara, yang terdiri atas negara-negara yang saling berhubungan secara geografis oleh daratan dan lautan, menghadapi tantangan serius terkait penyebaran kabut asap dan polusi udara. Dikelilingi Samudra Hindia di barat dan Samudra Pasifik di timur, serta ditutupi oleh pegunungan dan

hutan lebat, kawasan ini memiliki topografi yang beragam yang memengaruhi pergerakan udara dan distribusi polutan. Polusi udara antarnegara tidak mengenal batas-batas politik, dan angin menjadi salah satu faktor utama dalam penyebarannya.

Polusi udara dari kebakaran hutan dan lahan, serta aktivitas industri dan transportasi, dapat dengan mudah menyebar melalui pola angin regional, seperti angin muson. Lebih lanjut, topografi kawasan, seperti pegunungan dan lembah, juga memengaruhi pergerakan polusi udara, dengan kecenderungan polutan untuk terkonsentrasi di lembah dan terperangkap di antara pegunungan. Selain itu, kelembapan udara juga memainkan peran penting dalam penyebaran polusi udara. Kelembapan yang tinggi dapat membantu asap dan partikel polusi bertahan di atmosfer dan menyebar lebih jauh, serta meningkatkan dampaknya pada kualitas udara.

Dalam konteks ini, pemahaman tentang konektivitas geografis dan faktor-faktor penyebaran polusi udara menjadi penting dalam pengembangan strategi penanggulangan polusi udara lintas batas. Dengan kerja sama regional dan implementasi kebijakan yang efektif, diharapkan dapat menekan penyebaran polusi udara serta mengurangi dampak negatifnya pada kesehatan manusia, lingkungan, dan ekonomi di kawasan Asia Tenggara dan sekitarnya.

Dampak polusi kabut asap lintas batas tidak hanya dirasakan oleh negara-negara yang paling terpapar, tetapi juga dirasakan oleh negara-negara di kawasan Asia Timur, bahkan global. Asap yang mengandung polutan berbahaya dapat terbawa angin hingga ke negara-negara lain menyebabkan masalah kesehatan dan lingkungan.

2. Upaya Indonesia dalam Penanggulangan *Transboundary Haze Pollution*

Dalam mitigasi dan penanggulangan *transboundary haze pollution*, sebagai negara yang menjadi sumber polutan, Indonesia telah melakukan beberapa upaya. Langkah besar yang diambil Indonesia pada intinya adalah menekan terjadinya kebakaran hutan dan lahan dalam skala besar serta meminimalisasi dampak *haze* pada masyarakat, yang meliputi pencegahan, penanggulangan, dan program strategis.

a. Kebijakan Pemerintah Indonesia sebagai Upaya Pencegahan

Upaya yang telah dilakukan untuk mencegah kebakaran hutan di antaranya berdasarkan Undang-Undang Nomor 26 Tahun 2014:

1) memantapkan kelembagaan dengan membentuk Sub- Direktorat Kebakaran Hutan dan Lembaga nonstruktural berupa Pusat Pengendalian Kebakaran Hutan Nasional (Pusdalkarhutnas), Pusat Pengendalian Kebakaran Hutan Daerah (Pusdalkarhutda), Satuan Pelaksana (Satlak), dan brigade-brigade pemadam kebakaran hutan di setiap Hak Pengusahaan Hutan (HPH) dan Hutan Tanaman Industri (HTI);
2) melengkapi perangkat lunak berupa pedoman dan petunjuk teknis pencegahan, serta penanggulangan kebakaran hutan;
3) melengkapi perangkat keras berupa peralatan pencegah dan pemadam kebakaran hutan;
4) melakukan pelatihan pengendalian kebakaran hutan bagi aparat pemerintah, tenaga Badan Usaha Milik Negara (BUMN) dan perusahaan kehutanan serta masyarakat sekitar hutan;
5) melakukan kampanye dan penyuluhan melalui berbagai Apel Siaga pengendalian kebakaran hutan;
6) memberikan pembekalan kepada pengusaha (HPH, HTI, Perkebunan, dan transmigrasi), Kepala Wilayah (Kanwil) Kementerian Kehutanan dan jajaran pemda oleh Menteri Kehutanan dan Menteri Negara Lingkungan Hidup; dan
7) selalu mensyaratkan pembukaan hutan tanpa bakar dalam setiap persetujuan pelepasan kawasan hutan bagi pembangunan nonkehutanan.

b. Kebijakan Pemerintah Indonesia sebagai Upaya Penanggulangan

Di samping melakukan pencegahan, pemerintah juga melakukan penanggulangan ketika kebakaran hutan dan lahan sudah tidak terelakkan lagi, melalui berbagai kegiatan, antara lain sesuai Undang-Undang Nomor 26 Tahun 2014:

1) memberdayakan posko-posko kebakaran hutan di semua tingkat, serta melakukan pembinaan tentang hal-hal yang harus dilakukan selama siaga I dan II;
2) memobilisasi semua sumber daya (manusia, peralatan, dan dana) di semua tingkat, baik di jajaran Kementerian Kehutanan dan instansi lainnya, maupun di perusahaan-perusahaan;
3) meningkatkan koordinasi dengan instansi terkait di tingkat pusat melalui Pusdalkarhutnas dan di tingkat daerah melalui Pusdalkarhutda Daerah Tingkat I dan Satlak kebakaran hutan dan lahan; dan
4) meminta bantuan luar negeri untuk memadamkan kebakaran meliputi pasukan BOMBA dari Malaysia untuk kebakaran di Riau, Jambi, Sumsel, dan Kalbar; bantuan pesawat AT 130 dari Australia dan Hercules dari USA untuk kebakaran di Lampung; bantuan masker, obat-obatan dan kebutuhan lainnya dari negara-negara ASEAN.

c. Program Strategis Nasional Pemerintah Indonesia untuk Mengantisipasi *Transboundary Haze Pollution*

Transboundary haze pollution di Asia Tenggara merupakan masalah serius yang membutuhkan solusi komprehensif dan berkelanjutan. Upaya penanggulangan *transboundary haze pollution* telah dilakukan dengan beberapa program strategis sebagai berikut.

1) Kebijakan Pencegahan Kebakaran Hutan dan Lahan (PKHL): Kebijakan ini bertujuan untuk mencegah dan menanggulangi kebakaran hutan dan lahan dengan berbagai strategi, seperti penegakan hukum, patroli hutan, dan edukasi masyarakat (Mubariak & Sundstrom, 2016).
2) Rencana Aksi Nasional Udara Bersih (RAN-UB): Rencana ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas udara di Indonesia dengan berbagai program, seperti pengurangan emisi dari sektor industri dan transportasi, dan peningkatan pemantauan kualitas udara (Mubariak & Sundstrom, 2016).

3) Program Mangrove: Program ini bertujuan untuk merehabilitasi hutan bakau yang terbakar dan meningkatkan ketahanan kawasan pesisir terhadap kebakaran hutan dan lahan (Mubariak & Sundstrom, 2016).
4) Program Pencegahan Kebakaran Dini: Program ini menggunakan teknologi untuk memantau titik api dan memprediksi potensi kebakaran hutan dan lahan (Mubariak & Sundstrom, 2016).

3. Kerja Sama dalam Penanggulangan *Transboundary Haze Pollution*

a. Kerja Sama Perjanjian Bersama di Wilayah ASEAN

Kejadian *transboundary haze pollution* sudah terjadi berulang kali, terutama saat musim kemarau yang bertepatan dengan fenomena El Nino. Beberapa negara tetangga di kawasan Asia Tenggara telah melakukan berbagai upaya untuk mengurangi dampak dan bahkan mengambil langkah hukum jika menjadi korban *transboundary pollution* dari negara tetangganya. Tentu hal tersebut berlaku umum, tidak terbatas hanya pada kasus kebakaran hutan dan lahan di Indonesia.

Beberapa upaya telah dilakukan Singapura dalam menghadapi kejadian *transboundary pollution* dalam Laing dan Weger (2020), sebagai berikut.

1) *Transboundary Haze Pollution Control Act*: Undang-undang ini memberikan kewenangan kepada pemerintah Singapura untuk mengambil tindakan terhadap negara-negara tetangga yang menyebabkan *transboundary pollution*.
2) *The National Environment Agency* (NEA) *Haze Plan*: Rencana ini bertujuan untuk melindungi kesehatan masyarakat dan mengurangi dampak kabut asap *transboundary* di Singapura.
3) *The Regional Haze Action Plan* (RHAP): Rencana ini bertujuan untuk meningkatkan kerja sama regional dalam pencegahan dan penanggulangan *transboundary haze*.

4) *The Haze Alert System*: Sistem ini memberikan informasi kepada masyarakat Singapura tentang tingkat polusi udara dan langkah-langkah yang harus diambil untuk melindungi diri dari kabut asap.

Selain upaya masing-masing dalam negara, kerja sama regional di wilayah ASEAN, khususnya negara-negara yang berpotensi terkena dampak *transboundary haze pollution* telah melakukan aksi atau program bersama, seperti berikut ini.

1) The Southeast Asian Haze Coordination Centre (SEAHCC): Pusat koordinasi ini berfungsi untuk memfasilitasi pertukaran informasi dan kerja sama antarnegara ASEAN dalam mengatasi *transboundary haze pollution* (SEAHCC, 2024).
2) The ASEAN Haze Free Zone: Program ini bertujuan untuk mewujudkan kawasan ASEAN yang bebas *transboundary haze pollution* pada tahun 2020 (ASEAN, 2024).

Selain program tersebut, hal penting dalam penanggulangan bersama *transboundary haze pollution* adalah perjanjian yang mengikat beberapa negara di wilayah ASEAN, yaitu *ASEAN Agreement on Transboundary Haze Pollution* (AATHP). AATHP merupakan suatu perjanjian mutlak sebagai jawaban jalan keluar untuk mengatasi asap yang berulang kali terjadi setiap tahunnya, yang telah menimbulkan kerugian besar bagi negara-negara yang terimbas oleh asap tersebut. Pembentukan AATHP ini diharapkan mampu untuk mengatasi masalah kebakaran hutan dan lahan yang sering terjadi di Indonesia sehingga tidak akan ada lagi pencemaran kabut asap hingga lintas batas wilayah negara (Starke, 2012).

Namun, dengan belum diratifikasinya perjanjian ini oleh Indonesia, AATHP ini dianggap belum efektif. Persetujuan ASEAN ini memiliki banyak sekali bagian-bagian terpenting yang berpengaruh bagi Indonesia. Pada bab pertama dalam perjanjian ini dijelaskan ketentuan umum yang berlaku, seperti penggunaan istilah, tujuan, prinsip-prinsip, dan kewajiban.

*ASEAN Agreement on Transboundary Haze Pollution (*AATHP) dapat dikategorikan sebagai instrumen hukum internasional yang bersifat *soft law.* Karakteristik ini menyebabkan AATHP memiliki hambatan inheren untuk dapat diimplementasikan secara efektif, karena perjanjian tersebut hanya mengikat negara yang telah meratifikasinya dan tidak menyediakan sanksi hukum yang bersifat mengikat bagi negara yang tidak mematuhinya. Hal ini tampak jelas dengan tidak adanya konsekuensi hukum apa pun bagi Indonesia atas keterlambatannya meratifikasi AATHP hingga tahun 2014. Akibatnya, hingga tahun 2016, Indonesia masih belum memiliki peraturan perundang-undangan khusus yang mengatur upaya penanggulangan pencemaran asap lintas batas. Pengaturan yang ada hanya bersifat tidak langsung, yakni terkait pengelolaan hutan dan lahan yang tersebar di beberapa peraturan perundang-undangan, berikut:

1) Undang-Undang Nomor 41 tahun 1999 tentang Kehutanan, sebagaimana diubah dengan Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2004;
2) Undang-Undang Nomor 18 tahun 2004 tentang Perkebunan;
3) Undang-Undang Nomor 32 tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (PPLH);
4) Undang-Undang Nomor 18 tahun 2013 tentang Pencegahan dan Pemberantasan Perusakan Hutan. Secara spesifik, undang-undang ini tidak mengatur tindak pembakaran hutan, melainkan mengatur tentang tindak pidana perusakan hutan.

Salah satu kebijakan penting dan dianggap dapat menjadi jalan keluar untuk mencegah gambut mengalami kekeringan dan rawan terbakar adalah diterbitkannya Peraturan Pemerintah (PP) No. 71 Tahun 2014 juncto PP No. 57 Tahun 2016 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Ekosistem Gambut. Peraturan ini menjelaskan batas pemanfaatan gambut, yaitu tinggi muka air tidak boleh melebihi 40 cm dari permukaan tanah. Tujuannya adalah agar tanah gambut tetap terendam air cukup dalam sepanjang tahun.

Untuk mempertegas komitmen penyelamatan gambut, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) selanjutnya menerbitkan Peraturan Menteri LHK No. 16 Tahun 2017 tentang Pedoman Teknis Pemulihan Fungsi Ekosistem Gambut. Permen LHK tersebut mempertegas bahwa kubah gambut adalah komponen yang sangat vital dalam menjaga berjalannya fungsi Kesatuan Hidrologis Gambut (KHG). Kubah gambut yang berada di dalam area konsesi dan belum dilakukan budidaya wajib dipertahankan sebagai ekosistem dengan fungsi lindung. Dengan kata lain, segala bentuk kegiatan ekstraksi di atas area tersebut adalah terlarang. Larangan ini menimbulkan keraguan bagi para pelaku usaha ekstraktif untuk menanamkan modal, karena area produksi mereka beririsan dengan daerah terlarang ekosistem gambut.

b. Peran dan Komitmen Indonesia

Negara Republik Indonesia, sebagai anggota ASEAN, memegang teguh komitmennya untuk bekerja sama dalam pengendalian kebakaran hutan dan lahan serta penyebaran asap lintas batas negara. Prinsip-prinsip internasional yang telah disepakati dan kepentingan nasional, sesuai dengan Pancasila dan Undang-Undang Dasar Negara Republik Indonesia Tahun 1945, menjadi landasan dalam hal ini. Mengingat asap yang berasal dari kebakaran hutan dan lahan dapat menyebar lintas batas negara dan berpotensi merusak lingkungan, merugikan ekosistem, serta membahayakan kesehatan manusia, kerja sama antarnegara di Asia Tenggara dalam mengendalikan penyebaran asap lintas batas menjadi sangat penting.

Indonesia telah melakukan upaya pencegahan, penanggulangan, dan pemulihan dampak pencemaran asap akibat kebakaran hutan dan lahan di tingkat nasional. Namun, kesadaran akan perlunya penanganan bersama atas pencemaran asap lintas batas mendorong Indonesia dan negara-negara ASEAN lainnya untuk bekerja sama lebih erat. Kerja sama ini didasari oleh semangat kemitraan dan solidaritas di antara negara-negara ASEAN dalam mengatasi kendala penanganan asap lintas batas. Ini juga sesuai dengan prinsip hukum internasional yang menekankan hak berdaulat setiap negara untuk

mengelola sumber daya alam sesuai dengan kebijakan lingkungan dan pembangunan di wilayahnya, tetapi dengan tanggung jawab untuk mencegah pencemaran dan kerusakan lingkungan di wilayah lain.

Keberatan terhadap pencemaran asap lintas batas telah disampaikan oleh Malaysia kepada Indonesia melalui surat kepada Menteri Lingkungan Hidup Indonesia. Malaysia menyatakan keberatannya karena asap kebakaran hutan di Indonesia telah mencapai Malaysia, menyebabkan polusi udara di negaranya. Bahkan, *The National Environment Agency* (NEA) Singapura juga memperingatkan adanya kondisi berkabut akibat peningkatan jumlah *hotspot* di Indonesia. Oleh karena itu, penting bagi pemerintah Indonesia untuk menerapkan strategi dan kebijakan yang tepat, serta memberikan perhatian khusus agar dampak buruk dari kabut asap dapat diminimalisasi. Upaya ini bertujuan agar keluhan pencemaran asap lintas batas ke wilayah negara tetangga dapat dihindari di masa mendatang.

4. Tantangan dan Hambatan Pengendalian Kebakaran Hutan dan Lahan Gambut

a. Kebijakan Pemerintah yang Belum Sepenuhnya Berpihak pada Keberlangsungan Ekosistem Hutan dan Lahan Gambut

KLHK menerbitkan Permen LHK No. 10 Tahun 2019 tentang Penentuan, Penetapan, dan Pengelolaan Puncak Kubah Gambut Berbasis KHG. Kubah gambut yang sebelumnya menjadi area terlarang untuk dimanfaatkan diatur ulang untuk memfasilitasi aktivitas industri perkebunan ataupun kehutanan. Terlebih bagi perusahaan yang kesulitan berproduksi karena memiliki lebih dari satu kubah gambut di dalam wilayah kekuasaannya.

Program strategis nasional ini menjadi polemik ketika Menteri LHK menerbitkan Permen LHK No. 24 Tahun 2020 tentang Penyediaan Kawasan Hutan untuk Pembangunan *food estate*. Peraturan tersebut memperbolehkan pembangunan *food estate*

dilakukan di hutan produksi dan/atau kawasan hutan lindung. Meskipun aturan tersebut kemudian dicabut dan digantikan dengan Permen LHK No. 7 Tahun 2021 tentang Perencanaan Kehutanan, Perubahan Peruntukan Kawasan Hutan, dan Perubahan Fungsi Kawasan Hutan, serta Penggunaan Kawasan Hutan, secara substantif tidak banyak yang berubah. Bahkan, pada Pasal 485 masih dimungkinkan *food estate* dilakukan di kawasan hutan lindung.

Pendekatan Jakarta sentris yang membawa segala bentuk "barang" baru ke lokasi *food estate* mencabut nilai-nilai yang dipercayai masyarakat lokal selama ratusan tahun. Sebut saja 600 ha hutan di Desa Tewai Baru di Kabupaten Gunung Mas yang dibuka dan berubah fungsinya menjadi area kerja *food estate*. Tutupan pepohonan pun yang sebelumnya kaya akan hasil hutan, sekarang berubah menjadi hamparan kosong bekas tanaman singkong yang gagal tumbuh. Masyarakat desa yang sebelumnya hidup berdampingan dan menggantungkan hidup dari hasil hutan pun tersisihkan dari tanah leluhurnya karena adanya pembatasan akses untuk masuk ke dalam kawasan proyek (Permen LHK, 2020).

Pemerintah makin terang-terangan mengobral ekosistem gambut ketika disahkannya Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang (Perppu) No. 2 Tahun 2022 tentang Cipta Kerja (UUCK)–sebuah peraturan yang tidak semestinya disahkan karena tiada kedaruratan dalam penerbitannya. Catatan dari Pantau Gambut menyebutkan 857 perkebunan sawit seluas 3,4 juta ha telah aktif beroperasi di dalam kawasan hutan tanpa adanya perizinan kehutanan yang sah.

Kemudahan untuk berusaha di dalam kawasan hutan–termasuk gambut pun dimuluskan melalui dua skema yang diatur dalam pasal 110A dan 110B. Skema 110A mengatur bahwa perkebunan yang sebelumnya hanya memiliki izin dari pemerintah daerah sebelum UUCK berlaku, hanya perlu membayar biaya administrasi kepada KLHK sebagai kompensasi untuk melegalkan usahanya. Sementara itu, skema 110B membuka peluang bagi perkebunan ilegal untuk mendapatkan izin berusaha hanya dengan membayar

sanksi administratif. Padahal jelas bahwa perkebunan tidak boleh beroperasi di kawasan hutan.

b. Kondisi Alam dan Lemahnya Penerapan Hukum dan Kesepakatan

Perubahan iklim yang dipicu oleh pemanasan global meningkatkan risiko *transboundary pollution*. Perubahan iklim menyebabkan peningkatan frekuensi dan intensitas kekeringan di kawasan Asia Tenggara. Hal ini meningkatkan risiko terjadinya kebakaran hutan yang merupakan sumber *transboundary haze pollution*. Perubahan iklim juga menyebabkan perubahan pola angin yang memengaruhi penyebaran kabut asap dan membawa polutan ke wilayah yang sebelumnya tidak terpapar. Meningkatnya permukaan laut sebagai dampak pemanasan global menyebabkan intrusi air laut ke kawasan pesisir dan merusak hutan bakau serta ekosistem lainnya yang berperan penting dalam menyerap dan menghambat polutan udara tersebar.

Meskipun berbagai perjanjian, program kerja sebagai upaya telah dilakukan untuk mengatasi *transboundary haze pollution* di Asia Tenggara, masih terdapat beberapa kendala dalam penerapannya. Hal itu disebabkan oleh beberapa masalah berikut ini.

1) Kurangnya Koordinasi dan Kerja Sama Antarnegara

   Masalah ini merupakan salah satu hambatan utama dalam memerangi *transboundary haze pollution*. Kurangnya komunikasi dan kesatuan visi antarnegara dalam menanggulangi kebakaran hutan dan lahan, emisi industri, dan polusi udara lainnya menjadi penghambat kemajuan.

2) Perbedaan Kepentingan dan Prioritas Negara

   Setiap negara memiliki kepentingan dan prioritas pembangunan yang berbeda. Hal ini dapat menjadi kendala dalam mencapai kesepakatan bersama mengenai upaya penanggulangan *transboundary haze pollution*.

3) Lemahya Penegakan Hukum

Kurangnya mekanisme hukum yang kuat dan mengikat di tingkat regional untuk menindak negara-negara yang melanggar kesepakatan terkait *transboundary pollution*. Kelemahan penegakan hukum nasional juga terjadi karena penegakan hukum terhadap pembakaran lahan ilegal dan pelanggaran lingkungan lainnya masih lemah. Hal ini memungkinkan terjadinya pelanggaran berulang tanpa efek jera.

Kurangnya transparansi dan akuntabilitas dalam proses penegakan hukum dapat menimbulkan kecurigaan dan keraguan publik terhadap keseriusan pemerintah dalam menangani masalah ini. Dugaan adanya korupsi dalam penegakan hukum dapat menjadi celah bagi pelanggar lingkungan untuk lolos dari hukuman, sehingga menghambat upaya penanggulangan *transboundary haze pollution*.

c. Harapan dan Solusi

Beberapa tantangan yang dihadapi dalam penanggulangan masalah ini mencakup kurangnya koordinasi dan kerja sama antarnegara, keterbatasan sumber daya, kurangnya penegakan hukum, dan perubahan iklim. Untuk mengatasi tantangan tersebut, diperlukan solusi yang komprehensif dan berkelanjutan, seperti meningkatkan koordinasi dan kerja sama antarnegara, meningkatkan investasi dalam pencegahan dan penanggulangan kebakaran hutan dan lahan, memperkuat penegakan hukum, mengembangkan teknologi untuk memantau dan mengurangi emisi polusi udara, serta meningkatkan kesadaran masyarakat tentang bahaya kabut asap lintas batas.

Kesadaran publik memainkan peran kunci dalam upaya mengatasi *transboundary haze pollution*. Edukasi dan kesadaran masyarakat dapat secara signifikan membantu mengurangi faktor-faktor penyebab polusi udara dan meningkatkan dukungan untuk upaya penanggulangan. Berikut ini adalah beberapa alasan mengapa kesadaran publik sangat penting.

1) Pemahaman tentang dampak lingkungan dan kesehatan: Melalui edukasi, masyarakat dapat memahami dampak negatif *transboundary haze pollution* terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Mereka menyadari bahwa kabut asap tidak hanya merugikan bagi mereka secara langsung, tetapi juga bagi ekosistem dan spesies lainnya.
2) Pengetahuan tentang penyebab dan dampak polusi: Dengan pemahaman yang lebih baik tentang penyebab polusi udara, seperti pembakaran hutan dan lahan, masyarakat dapat mengambil langkah-langkah preventif untuk mengurangi kontribusi mereka terhadap masalah ini. Mereka juga dapat mengenali gejala dan risiko kesehatan yang terkait dengan paparan kabut asap.
3) Peningkatan partisipasi dalam upaya penanggulangan: Kesadaran publik yang tinggi dapat mendorong masyarakat untuk aktif terlibat dalam upaya penanggulangan polusi udara, baik melalui partisipasi dalam program pembersihan lingkungan, kampanye penyuluhan, maupun mendukung kebijakan yang bertujuan untuk mengurangi emisi polutan.
4) Tekanan terhadap pemerintah dan industri: Dengan adanya kesadaran publik yang kuat, masyarakat dapat menuntut tindakan lebih konkret dari pemerintah dan industri untuk mengatasi masalah *transboundary haze pollution.* Mereka dapat meminta penerapan kebijakan yang lebih ketat terkait dengan pengelolaan hutan, pengendalian emisi industri, dan penegakan hukum yang lebih kuat.
5) Penggalangan dukungan internasional: Kesadaran publik yang tinggi juga dapat membantu menggalang dukungan internasional dalam upaya mengatasi masalah *transboundary haze pollution*. Dengan menyoroti masalah ini secara global, masyarakat dapat memperkuat tekanan pada negara-negara dan organisasi internasional untuk bekerja sama dalam penanggulangan polusi udara lintas batas.

Dengan demikian, edukasi dan kesadaran masyarakat tidak hanya penting untuk mengubah perilaku individu, tetapi juga penting untuk menciptakan perubahan yang lebih luas dalam kebijakan dan praktik yang berkontribusi pada *transboundary haze pollution*. Mendorong kesadaran publik yang lebih besar akan menjadi langkah penting dalam mencapai lingkungan yang lebih bersih dan lebih sehat bagi semua.

Daftar Pustaka

ASEAN. (2002). *ASEAN agreement on transboundary haze pollution*. https://asean.org/wp-content/uploads/2021/01/ASEANAgreementonTransboundaryHazePollution-1.pdf

Brown, A., & Davis, K. (1973). *Forest fire control and use*. McGraw-Hill.

Chakraborty, M. (2015). Assessing air quality over the Indian subcontinent using a regional chemical transport model (WRF-Chem). *Atmospheric Science Letters*, 6(5), 438445.

European Environmental Agency. (n.d.). *Glossarium*. Diakses 15 Juni 2007, dari https://www.EEA.org/glossarium

Forum Geosaintis Muda Indonesia. (n.d.). *Rekam jejak kebakaran hutan di Indonesia*. https://fgmi.iagi.or.id/berita/berita-dunia-geosaintis/rekam-jejak-kebakaran-hutan-di-indonesia

Haniy, S. U., Hamzah, H., & Hanifah, M. (2019, 7 Oktober). Intense forest fires threaten to derail Indonesia's progress in reducing deforestation. World Resources Institute. https://www.wri.org/insights/intense-forest-fires-threaten-derail-indonesias-progress-reducing-deforestation

Huijnen, V., Wooster, M. J., Kaiser, J. W., Gaveau, D. L. A., Flemming, J., Parrington, M., Inness, A., Murdiyarso, D., Main, B., & van Weele, M. (2016). Fire carbon emissions over maritime southeast Asia in 2015 largest since 1997. *Scientific Reports*, 6, Article 26886. https://doi.org/10.1038/srep26886

Kebakaran hutan terparah di Indonesia paling sering di Kalimantan. (n.d.). *Tempo*. https://tekno.tempo.com/read/1768725/5

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2022). *Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor SK.168/MENLHK/PKTL/PLA.1/2/2022 tentang Indonesia's Forestry and Other Land Use (FOLU) Net Sink 2030 untuk Pengendalian Perubahan Iklim: Rencana Operasional Indonesia's FOLU Net Sink 2030*.

Laing, T., & Weger, M. (2020). The haze problem in Southeast Asia. In *The Routledge handbook of Southeast Asian environmental management* (pp. 412–436). Routledge.

Mubariak, A., & Sundstrom, K. (2016). Transboundary haze pollution in Southeast Asia: A review of its causes, impacts, and potential solutions. *Journal of Environmental Management*, *178*, 148–164.

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 24 Tahun 2020 tentang Penyediaan Kawasan Hutan untuk Pembangunan Food Estate.

Presiden Republik Indonesia. (2015). *Instruksi Presiden Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2015 tentang Penundaan Pemberian Izin Baru dan Penyempurnaan Tata Kelola Hutan Alam Primer dan Lahan Gambut*. https://faolex.fao.org/docs/pdf/ins178913.pdf

Rhee, S. H., & Baik, N. (2017). Transboundary haze pollution in Southeast Asia: A regional environmental problem with global implications. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, *53*(1), 1–21.

Soemarsono. (1997, Desember 16). *Kebakaran lahan, semak belukar dan hutan di Indonesia (penyebab, upaya dan perspektif upaya di masa depan)* [Makalah presentasi]. Simposium Dampak Kebakaran Hutan Terhadap Sumberdaya Alam dan Lingkungan, Yogyakarta, Indonesia.

Sok, V., Peteru, S., Silviana, S. H., & Evans, M. (2024, 18 November). *Refleksi respons Asia Tenggara terhadap kabut asap lintas batas saat kemarau tiba*. CIFOR-ICRAF Forests News. https://forestsnews.cifor.org/90277/refleksi-respons-asia-tenggara-terhadap-kabut-asap-lintas-batas

Starke, J. G. (2012). *Pengantar hukum internasional* (10th ed.; B. I. Djajaatmadja, Terj.). Sinar Grafika.

Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., & Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059–2077. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1

Suryani, A. S. (2012). *Handling smoke haze from forest fire at border regions in Indonesia*. Pusat Pengkajian, Pengolahan Data dan Informasi (P3DI), Sekretariat Jenderal DPR RI.

Tempo.co. (2023, 6 September). *5 kebakaran hutan terparah di Indonesia, paling sering di Kalimantan*. https://www.tempo.co/lingkungan/5-kebakaran-hutan-terparah-di-indonesia-paling-sering-di-kalimantan--147402

Undang-Undang Nomor 26 Tahun 2014 tentang Pengesahan ASEAN Agreement on Transboundary Haze Pollution (Persetujuan ASEAN tentang Pencemaran Asap Lintas Batas).

Bab IX
Dampak Polusi Udara pada Lingkungan

Lilik Slamet Supriatin

Manusia, hewan, tumbuhan, dan mikroorganisme berinteraksi secara langsung dengan lingkungan udara atau atmosfer. Walaupun atmosfer tidak menjadi habitat bagi makhluk hidup, kondisi lingkungan udara sangat memengaruhi kualitas dan keberlanjutan lingkungan serta makhluk hidup di dalamnya. Oleh karena itu, perlu sekali untuk menjaga kelestarian dan keasrian lingkungan udara sebagai sumber daya alam kehidupan.

Kualitas lingkungan udara yang sangat buruk juga dapat mengurangi kuantitas spesies makhluk hidup dan mendegradasi lingkungan perairan serta lahan. Polusi udara akan berdampak

L. S. Supriatin
Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: lili012@brin.go.id

© 2026 Editor & Penulis

Supriatin, L. S. (2026). Dampak Polusi Udara pada Lingkungan. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (179–211). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1813
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

pada kualitas, kuantitas, serta kontinuitas makhluk hidup dan lingkungannya.

Kondisi kualitas lingkungan udara yang buruk dapat berpengaruh, baik langsung maupun tidak langsung pada makhluk hidup. Secara langsung, kualitas lingkungan udara yang buruk dapat merusak sistem pernapasan, sistem transpor, sistem syaraf makhluk hidup (Hourani et al., 2006; Puspitasari & Fauziah, 2023), bersifat karsinogenik (Torjesen, 2015), merusak jaringan kulit, dan merusak jaringan organ penglihatan (Zhang et al., 2020), berpengaruh dan berkontribusi pada iklim (Ivanova, 2020; Pratama & Parinduri, 2019), serta mendegradasi lingkungan perairan dan tanah. Secara tidak langsung, degradasi kualitas lingkungan udara dapat memengaruhi makhluk hidup dengan sebelumnya menurunkan kualitas lingkungan perairan dan tanah yang pada akhirnya akan berdampak buruk pada makhluk hidup. Oleh karena itu, penting sekali untuk mengetahui dampak penurunan kualitas lingkungan udara atau polusi udara pada makhluk hidup dan lingkungannya.

A. Klasifikasi Dampak Polusi Udara

Dampak polusi udara dapat dikategorikan menjadi dampak langsung dan dampak tidak langsung. Klasifikasi ini berdasarkan beberapa kriteria berikut.

1) Spasial, yaitu lokasi dan jarak antara sumber polusi udara dan objek yang terkena dampak, termasuk jaraknya terhadap laut.
2) Temporal, yaitu waktu yang diperlukan objek untuk terpapar oleh polutan udara.
3) Konsentrasi atau kadar dan ukuran partikel (kuantitas) polutan udara.
4) Topografi alami atau tekstur dan struktur kota.
5) Sirkulasi udara, khusus untuk polusi udara *indoor*.
6) Ada tidaknya unsur cuaca, seperti curah hujan, kecepatan angin, dan radiasi matahari.

Jarak antara sumber polutan dan objek terpapar polutan udara dan laut akan memengaruhi cepat atau lambatnya serta langsung atau tidak langsung suatu objek yang terdampak polusi udara. Hal ini karena makin dekat jarak antara sumber polusi dan objek terpapar dengan laut, makin besar angin darat membawa dan mengencerkan polutan udara dari sumbernya ke laut untuk diabsorpsi (serap), sehingga polutan udara dapat dinetralkan oleh laut. Laut adalah salah satu media perosot (*sinker*) yang dapat menyerap polutan udara.

Tekstur suatu kota adalah kasar atau halusnya permukaan suatu kawasan kota. Kota dengan banyak ruang terbuka hijau akan memiliki tekstur kasar sehingga dapat berpotensi meredam polutan udara, baik secara fisik maupun kimiawi. Sebaliknya, kota dengan tekstur halus seperti beton, aspal, dan kaca tidak akan menyerap polutan udara, malahan meneruskan polutan udara dan energi yang dikandung polutan udara.

Struktur kota dengan bangunan rapat dan menjulang tinggi mengakibatkan angin bergerak terbatas sehingga sirkulasi udara kawasan kota terhambat dan tidak dapat mengencerkan polutan udara serta timbulnya panas terasa (*sensible heat*). Struktur kota seperti ini dapat disamakan dengan kondisi topografi berbentuk cekungan. Topografi berbentuk cekungan mengakibatkan polutan udara yang sudah masuk ke bentang alam tersebut akan tertahan (*stagnan*) dan tidak dapat keluar sehingga terjadi akumulasi polutan udara yang membahayakan makhluk hidup.

Dampak langsung polusi udara dari sisi temporal artinya manusia atau objek tidak akan membutuhkan waktu lama untuk terkena dampak emisi polutan udara. Hal ini karena dari sisi spasial, lokasi antara sumber emisi polutan udara dan makhluk hidup atau objek memiliki jarak yang relatif dekat. Polutan udara tidak memerlukan waktu lama untuk mencapai sasaran, baik makhluk hidup maupun objek lain yang akan terkena dampak polusi udara.

Dampak langsung polusi udara juga dipengaruhi oleh kadar polutan udara yang relatif tinggi dan ukuran partikel polutan

udara yang relatif kecil. Intensitas waktu terpapar polutan udara relatif tinggi, serta topografi alami yang berbentuk datar, struktur kota yang menghambat sirkulasi udara, tekstur kota yang halus, jarak antara objek dan sumber polutan dengan laut yang relatif jauh, dan unsur cuaca yang bersifat tidak mendukung penyebaran polutan udara yang meliputi hujan, kecepatan angin relatif rendah, dan intensitas radiasi matahari yang kurang juga memengaruhi dampak langsung polusi udara.

Berkenaan dengan dampak tidak langsung polusi udara, faktor yang berpengaruh sama dengan dampak langsung, tetapi memiliki karakteristik yang berbeda sebagai berikut.

1) Spasial, yaitu jarak antara lokasi sumber emisi polutan udara dan objek relatif jauh, bahkan dapat bersifat *long range transport air pollution* (transportasi polutan yang memiliki jarak antara sumber polusi udara dan daerah terkena dampak melebihi jarak 100 km) dan *transboundary pollution* (melintasi batas administrasi suatu negara); serta jarak antara sumber polutan dan objek dengan laut relatif dekat.
2) Temporal, yaitu objek terpapar polutan udara sampai terdampak memerlukan waktu relatif lama.
3) Konsentrasi polutan udara rendah.
4) Topografi alami berbentuk cekungan.
5) Terdapat unsur cuaca yang bersifat mendukung penyebaran dan pengenceran polutan udara, karena adanya hujan, kecepatan angin relatif tinggi, dan radiasi matahari kuat.

Dampak polusi udara secara keseluruhan tidak hanya dirasakan pada lingkungan udara atau atmosfer saja, tetapi juga pada lingkungan perairan (badan air dan laut) serta lahan. Selain itu, beberapa sektor kehidupan, seperti kesehatan, transportasi, pendidikan, pariwisata, perikanan, pertanian, dan energi juga dapat terdampak negatif. Adanya zat pencemar berupa gas mengakibatkan komposisi dari atmosfer tidak standar lagi sehingga polusi udara juga dapat mengubah distribusi aliran massa dan energi serta

neracanya. Sebagian besar dampak polusi udara akan berkaitan dengan aspek kesehatan.

Kusnoputranto dan Susanna (2000) memperkirakan bahwa di Indonesia ke depan akan terdapat dua pola penyakit, yaitu penyakit yang disebabkan infeksi oleh mikroorganisme dan penyakit yang disebabkan oleh *non-living organism,* yaitu penyakit yang disebabkan oleh zat-zat kimia, salah satunya akibat dampak polusi udara.

Polutan udara secara langsung dapat berdampak pada kesehatan manusia melalui jalan masuk ke pancaindra. Selain secara langsung, polutan udara dapat secara tidak langsung masuk ke manusia melalui makanan berupa buah dan sayuran yang dikonsumsi mentah atau tanpa pengolahan terlebih dahulu.

Budidaya tanaman buah dan sayuran dengan cara penyemprotan pestisida dan/atau insektisida yang tidak sesuai prosedur dan takaran (dosis) dengan tujuan hanya untuk memperoleh komoditas yang tampak luarnya berkualitas tinggi akan mengakibatkan adanya kandungan bahan kimia dalam buah dan sayuran yang berbahaya bagi kesehatan konsumen.

Penyakit di Indonesia selain penyakit karena bakteri, jamur, dan virus (penyakit karena *living organism*), juga disebabkan oleh zat kimia dalam bentuk polutan udara (*non-living organism*). Perubahan iklim juga turut memicu kedua jenis penyakit tersebut. Penyakit jenis pertama yang disebabkan oleh bakteri, jamur, dan virus dijelaskan oleh model ekologi Bahn dan Mausner (1974) dalam Iffani et al. (2019) yang menyatakan bahwa penyakit dipengaruhi oleh tiga faktor, yaitu *host* (penjamu), agen (penyebab), dan lingkungan. Faktor lingkungan di sini mencakup iklim dan perubahannya serta kondisi kualitas lingkungan termasuk polusi udara.

Dampak polusi udara pada makalah ini mencakup dampak terhadap visibilitas, cuaca dan iklim, kualitas hujan, serta iklim perkotaan (Godish, 2003). Sebagai tambahan juga akan diuraikan dampak bising, polusi cahaya, dan dampak polusi udara pada bau.

B. Dampak Polusi Udara pada Visibilitas dan View Kota

Polutan udara berdampak pada visibilitas atau jangkauan daya penglihatan yang dipengaruhi secara fisik dan kimia. Secara fisik, ukuran diameter partikel dari polutan udara memengaruhi visibilitas. Partikel polutan udara yang berdiameter sama dengan panjang gelombang cahaya tampak (0,4–0,7 μm) akan efektif menghamburkan cahaya sehingga daya visibilitas di lokasi terpolusi oleh partikel yang berdiameter lebih kecil dari 2,5 μm akan menurun dan lebih berbahaya dibandingkan PM_{10} (Godish, 2003).

Sementara itu, secara kimia, polutan udara dapat menyerap cahaya matahari sehingga visibilitas menurun. Penghamburan cahaya dipengaruhi oleh komposisi kimia polutan udara jenis aerosol (partikel padat atau cair yang terdispersi dalam medium gas atau udara). Komposisi kimia yang berbeda dari aerosol akan menghasilkan penghamburan radiasi matahari kembali ke ruang angkasa yang berbeda pula. Ukuran, konsentrasi, dan distribusi dari polutan udara jenis aerosol akan memengaruhi pembentukan awan dan visibilitas. Makin banyak awan terbentuk, visibilitas menurun, tetapi kejadian hujan meningkat.

Polutan udara jenis aerosol adalah pendingin atmosfer yang bersifat menyeimbangkan pemanasan oleh gas rumah kaca (GRK). Aerosol sulfat yang bersifat higroskopis akan menyerap cahaya lebih efisien.

Polutan udara jenis NO_2 (nitrogen dioksida) menyerap cahaya dengan panjang gelombang relatif pendek seperti cahaya biru, tetapi setelah itu akan memantulkan cahaya dengan panjang gelombang yang relatif lebih panjang (cahaya kuning) ke mata (Godish, 2003). Adanya polutan udara jenis NO_2 dengan konsentrasi tinggi pada udara ambien akan mengakibatkan *view* dari langit berwarna lembayung (kuning kecokelatan) yang akan mengakibatkan mata menjadi iritasi dan sakit

Di pedesaan (kawasan rural), dampak polutan udara berupa penurunan visibilitas berasal dari erupsi gunung api serta kebakaran

hutan dan lahan. Walaupun polutan udara dari kebakaran hutan dan lahan bersumber di kawasan *rural*, penyebaran *smoke* dan dampaknya dapat mencapai jarak yang jauh dari sumber polusinya, bahkan sampai melintasi batas antarnegara (*long transboundary layer*).

Dampak polusi udara dari kebakaran hutan dan lahan atau dari badai debu serta pasir sering kali mengakibatkan hubungan kedua negara yang saling berbatasan, baik batas darat maupun laut, menjadi kurang harmonis. Sementara itu, di kawasan perkotaan (*urban*), penurunan visibilitas karena polusi udara disebabkan oleh industri dan transportasi.

Secara alami, ketika erupsi gunung api terjadi, debu vulkanik akan berdampak pada jangkauan jarak pandang. Umumnya, hal tersebut berdampak pada sektor transportasi, khususnya penerbangan, yakni visibilitasnya hanya beberapa meter saja sehingga membahayakan keselamatan (USGS, 2010).

Kebakaran hutan dan lahan yang ekstrem juga dapat menurunkan visibilitas sehingga jarak pandang tidak sampai puluhan meter. Partikulat atau debu juga merupakan sumber utama *haze* (kabut asap) yang dapat menurunkan visibilitas atmosfer.

Soedomo (2001) menyatakan bahwa dampak debu pada visibilitas atmosfer mulai timbul jika konsentrasinya dalam atmosfer sudah mencapai 26 $\mu g/m^3$. Kebakaran hutan tidak saja berdampak pada visibilitas, tetapi juga berdampak pada hewan-hewan di hutan yang menjadikan hutan sebagai habitat akan kehilangan tempat tinggalnya serta berpotensi terancam punah.

Punahnya hewan herbivora yang berhabitat di hutan akan mengakibatkan efek domino pada populasi hewan karnivora yang juga berkurang, bahkan akan punah. Kebakaran hutan dan punahnya hewan herbivora dan karnivora menyebabkan detritivor atau pengurai memiliki populasi yang makin besar sehingga unsur anorganik sebagai hasil kerja pengurai akan

makin besar jumlahnya. Manusia tidak dapat secara langsung memakan unsur anorganik sehingga akibat akhir dampak polusi udara adalah punahnya manusia.

Tabel 9.1 berikut menyajikan pengaruh dari jenis polutan udara terhadap persentase visibilitas yang dilakukan penelitiannya di Amerika Serikat (USA). Berdasarkan Tabel 9.1 diketahui bahwa jenis polutan udara yang berbahaya dan menurunkan visibilitas adalah elemen karbon termasuk partikel *black carbon* sebesar 85% sampai dengan 95% di kedua lokasi penelitian. Posisi kedua, jenis polutan udara yang menurunkan visibilitas adalah jenis polutan nitrat (NO_3^-) sebesar 55% sampai dengan 95%.

Tabel 9.1 Persentase Visibilitas Akibat Pengaruh Jenis Polutan Udara

No.	Jenis Polutan Udara	Bagian Timur USA	Bagian Barat USA
1.	Sulfat	20–40	35–75
2.	Karbon organik	70–90	65–85
3.	Nitrat	85–95	45–95
4.	Elemen karbon	85–95	85–95

Sumber: USEPA (2000)

Selain dampak polutan udara terhadap visibilitas, polutan udara juga akan tampak pengaruhnya pada *view* atau kenampakan suatu kota. Daerah dengan polusi udara ringan sangat sukar dideteksi dengan kasatmata saja, tetapi dapat dideteksi oleh instrumen pengukur emisi dan konsentrasi polutan udara.

Berbeda dengan polusi udara, polusi air lebih mudah dideteksi karena kontaminan dengan konsentrasi rendah sekalipun sudah dapat mengubah warna air dari warna semula. Hal ini karena polusi udara terdiri atas sejumlah gas polutan udara yang bersifat tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa, terutama pada konsentrasi relatif rendah, contohnya adalah gas CO (Godish, 2003).

Kota yang sudah mengalami polusi udara yang parah akan terindikasi dari berkurangnya jarak pandang (*visibility*) terhadap cakrawala. Berdasarkan tingkat polusi udara, *view* suatu kota dapat dikelompokkan menjadi *gray air cities* dan *brown air cities*.

Gray air cities adalah kota-kota yang memperlihatkan cakrawala langitnya didominasi oleh langit berwarna abu-abu. Kota dengan cakrawala langit berwarna abu-abu ini disebabkan polutan udara jenis belerang atau sulfur oksida (SO_2 dan SO_4) berkonsentrasi tinggi. Kota *gray air cities* ini disebabkan oleh dominasi transportasi berbahan bakar solar atau bahan bakar bensin dengan kadar belerang relatif tinggi (0,5–5% massa), rumah tangga yang menggunakan batu bara untuk energi bahan bakar memasak, pembangkit listrik tenaga uap, kawasan pabrik dan industri yang menggunakan bahan bakar batu bara dan menggunakan sulfat sebagai bahan baku industrinya.

Warna abu-abu ini berasal dari *smog* (kabut asam di atmosfer dari asam sulfat) yang akan berdampak pada korosi bahan logam, menyebabkan iritasi mata, dan merusak paru-paru. Kota-kota yang berpotensi terbentuknya *gray air cities* (*industrial smog*) adalah kota dengan iklim dingin atau basah/hujan (Kusnoputranto & Susanna, 2000).

Sumber: Yang et al (2021)

Gambar 9.1 Cakrawala Langit dengan *Gray Air Cities*

Berdasarkan Gambar 9.1, tampak sebuah kota dengan cakrawala yang berwarna keabu- abuan yang terpolusi berat oleh

polutan sulfat. Oleh karena itu, dahulu terdapat program "Langit Biru" yang dicanangkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) untuk menciptakan kota yang minim polutan udara. Konsentrasi aerosol membuat langit pada siang hari tampak lebih putih. Kenampakan warna langit dipengaruhi oleh panjang gelombang radiasi yang dipancarkan dari permukaan. Polutan udara yang dihasilkan oleh aktivitas industri, transportasi, erupsi gunung, serta kebakaran hutan dan lahan memancarkan radiasi gelombang panjang yang menyebabkan langit tidak berwarna biru, tetapi lebih ke arah warna putih atau jingga yang secara langsung membuat mata sakit.

Brown air cities adalah kota-kota yang cakrawala langitnya didominasi oleh langit berwarna cokelat kekuningan. Kota dengan cakrawala langit berwarna cokelat ini disebabkan polutan udara jenis nitrogen oksida (NO_x) berkonsentrasi tinggi. Kota *brown air cities* ini disebabkan oleh dominasi transportasi kendaraan bermotor berbahan bakar fosil jenis bensin dengan kadar belerang relatif rendah. *Brown air cities* terjadi melalui proses fotokimia dengan bantuan radiasi sinar matahari berintensitas relatif tinggi. *Brown air cities* hanya dapat terjadi di iklim tropis dengan intensitas radiasi tinggi sepanjang tahun (terutama pada musim kemarau) dan iklim subtropis pada musim panas (*summer*) dan saat terjadinya gelombang panas. Dampak *brown air cities* ini di samping menghasilkan bau yang tidak sedap juga dapat merusak saluran pernapasan, menyebabkan iritasi pada paru-paru dan mata, dan berkontribusi pada kerusakan jantung, hati, dan ginjal (Kusnoputranto & Susanna, 2000).

Sumber: Yang et al (2021)

Gambar 9.2 Kota dengan cakrawala *Brown Air Cities*

Berdasarkan Gambar 9.2, tampak pemandangan langit di kota berwarna cokelat kekuningan. Hal ini menunjukkan kadar polutan oksida nitrogen yang sudah berkonsentrasi tinggi. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan juga mencanangkan Program Kampung Iklim (Proklim) yang membina banyak desa untuk tanggap terhadap perubahan iklim dan polusi udara. Melalui program ini, desa-desa dibina untuk memitigasi polutan udara dan perubahan iklim dengan menanam pohon, reboisasi, mengelola sampah, memanen air hujan, serta mengonservasi tanah dan air.

C. Dampak Polusi Udara pada Cuaca dan Iklim

Selain abu vulkanik, erupsi gunung api melepaskan polutan udara jenis aerosol. Sejak abad ke-19, tercatat ada empat erupsi gunung api terbesar di dunia, yaitu erupsi Gunung Tambora (Nusa Tenggara Barat) pada tahun 1815, erupsi Gunung Krakatau (Selat Sunda) pada tahun 1883, erupsi Gunung El Chichón (Meksiko) pada tahun 1982, dan erupsi Gunung Pinatubo (Filipina) pada tahun 1991. dan

dua erupsi gunung api terdapat di Indonesia, dan. Keempat erupsi gunung api ini mengubah cuaca dan iklim dunia.

Aerosol polutan udara sulfat yang dilepaskan oleh erupsi gunung api sampai terlontar jauh lintas batas negara, bahkan benua. Erupsi Gunung Tambora yang terjadi pada tahun 1815 mengakibatkan benua Eropa tidak mengalami musim panas. Salah satu faktor yang diduga berkontribusi pada kekalahan Napoleon Bonaparte adalah cuaca ekstrem yang dipicu oleh erupsi Gunung Tambora, yang mengubah perkiraan cuaca musim panas menjadi musim dingin

Erupsi gunung Krakatau bahkan letusan dan debunya sampai ke negara Sri Lanka. Erupsi Gunung El Chichón dan Pinatubo menyebabkan pendinginan dunia selama beberapa tahun (Graves & Reavey, 1996). Hal ini karena aerosol sulfat adalah inti kondensasi untuk pembentukan awan-awan hujan. Erupsi gunung api yang hebat dapat memperpanjang musim penghujan dan periode La Nina serta memperpendek periode El Nino.

Dampak polutan udara dari erupsi gunung api terhadap cuaca dan iklim dipengaruhi oleh *Volcanic Exploisivity Index* (VEI), yaitu angka tidak bersatuan yang menyatakan kekuatan dari erupsi suatu gunung api. Makin besar nilai VEI, makin tinggi kepulan asap dan awan panas serta luas area penyebaran emisi polutan udaranya. Tabel 9.2 menyajikan nilai VEI dari beberapa gunung api di Indonesia yang pernah erupsi.

Tabel 9.2 Nilai VEI Beberapa Erupsi Gunung di Indonesia

Nama gunung api	Tanggal erupsi	Nilai VEI
Merapi	8 November 2010	4
Kelud	Maret 1990	4
Colo	Desember 1983	4
Galunggung	8 Januari 1983	4
Agung	27 Januari 1964	5
Krakatau	Agustus 1883	6

Sumber: Supriatin (2017)

Berdasarkan Tabel 9.2 dapat diketahui bahwa VEI dari erupsi Gunung Krakatau adalah yang paling tinggi. Walaupun nilai VEI dari beberapa erupsi gunung api di Indonesia sebagian besar adalah 4, tinggi letusan maksimum dan area penyebaran polutan udara dipengaruhi oleh ketinggian gunung dari permukaan tanah, topografi, serta faktor meteorologi terutama arah dan kecepatan angin, hujan, kelembapan udara, dan radiasi matahari saat erupsi gunung. Ketinggian gunung dapat disamakan dengan ketinggian cerobong asap pada pabrik.

Selain aerosol sulfat, erupsi gunung api juga melepaskan CO (karbon monoksida) dan H_2S (asam sulfida). Richard et al. (1987) menyatakan besarnya emisi SO_2 menempati 9% dari emisi total erupsi gunung api. Ditambahkan oleh Sawyer et al. (2008) bahwa persentase dari senyawa-senyawa gas tersebut tidak selalu sama untuk setiap gunung dan ketika kejadian letusan gunung api.

Selain berpengaruh pada kuantitas curah hujan, adanya aerosol sulfat juga berdampak pada kualitas curah hujan, yaitu hujan asam. Berdasarkan kualitasnya, curah hujan dikelompokkan ke dalam hujan asam, hujan basa, dan hujan netral (Alfiandy et al., 2021).

Aerosol sulfur yang dilepaskan ke atmosfer akan membentuk SO_2. Sulfur dioksida (SO_2) teroksidasi di atmosfer membentuk SO_3 (sulfur trioksida). Gas SO_3 bersifat mudah larut dalam air sehingga pada udara lembap (udara yang banyak mengandung uap air) menghasilkan asam sulfat (H_2SO_4). Uap air yang telah mengandung H_2SO_4 ini merupakan bagian dari awan dan selanjutnya akan berkondensasi, lalu turun sebagai hujan yang airnya bersifat asam dengan pH atau derajat kemasaman kurang dari 5,6.

D. Dampak Polusi Udara pada Kualitas Hujan

Air hujan memiliki aspek kuantitas dan kualitas. Aspek kuantitas curah hujan mencakup tinggi atau tinggi curah hujan yang bersatuan mm, durasi (lama) hujan, dan intensitas hujan (mm/jam). Sementara itu, aspek kualitas curah hujan mencakup derajat kemasaman air hujan (pH) dan ukuran diameter butir hujan.

Dalam ilmu lingkungan, dikenal istilah deposisi atmosfer, yaitu partikel yang mengendap di atmosfer. Deposisi atmosfer dapat dibedakan menjadi deposisi kering, yaitu partikel padat yang tersuspensi dalam atmosfer yang berupa gas, serta deposisi basah, yaitu ketika materi deposisi kering tersebut sudah terlarut dalam air hujan. Secara fisik, deposisi kering berbentuk debu; secara kimia, debu tersebut mengandung zat kimia polutan udara.

Deposisi atmosfer ini juga dapat ditinjau dari sisi biologi. Deposisi atmosfer juga dapat membawa mikroorganisme patogen (merugikan) yang dapat menimbulkan penyakit ketika mengendap di permukaan.

Bakteri adalah mikroorganisme yang bersifat ubikuitus, yang berarti jumlahnya sangat berlimpah secara kuantitas. Madigan et al (2009) menyatakan bahwa total jumlah bakteri yang mendiami bumi sebesar 5×10^{30}. Selain itu, bakteri dapat ditemukan di hampir semua tempat di dunia, baik di darat, laut, maupun udara atau hidup sebagai parasit pada makhluk hidup lain (inangnya) (Supriatin, 2014). Beberapa komunitas bakteri juga dapat hidup di dalam awan sampai ketinggian 10 km dari permukaan.

Deposisi kering mengandung SO_2, Ozon, dan NO_2. Baik deposisi kering maupun deposisi basah, berbahaya. Dampak deposisi kering adalah pada sistem pernapasan, mata, dan kulit.

Deposisi kering dengan ukuran partikel lebih kecil dari 2,5 μm ($PM_{2,5}$), jika terhirup saat bernapas, akan menurunkan fungsi paru-paru. S*ilicosis* adalah penyakit karena terhirupnya debu silika bebas (SiO_2) ke dalam paru-paru.

Deposisi kering yang mengenai kulit akan menimbulkan iritasi dan gatal pada kulit. Deposisi kering yang dilepaskan dari erupsi gunung api berupa debu silikat yang berbentuk runcing akan berbahaya jika masuk ke dalam mata.

Deposisi kering juga berpengaruh pada keanekaragaman hayati. Karena terpapar polusi udara dalam jangka waktu yang lama, vegetasi di Pegunungan San Bernardino di bagian Selatan California, berubah dari komunitas pohon pinus yang sebagian

besar mati menjadi komunitas pohon *oak* dan semak belukar (Barker & Tingey, 1992, sebagaimana dikutip dalam Liu & Liptak, 1999). Perubahan komunitas ini disebabkan adanya polutan udara jenis oksidan fotokimia.

Dampak dari deposisi basah polutan udara adalah berupa hujan asam. Secara alami dan netral, derajat kemasaman air hujan (pH) adalah sebesar 5,6. Hujan asam adalah air hujan dengan pH lebih kecil dari 5,6. Hujan basa memiliki pH di atas 5,6 (Alfiandy et al., 2021).

Robert Angus Smith, seorang ilmuwan berkebangsaan Inggris, adalah orang pertama yang menghubungkan antara pencemaran udara dan dampaknya berupa hujan asam, pada tahun 1852. Dua puluh tahun kemudian (1872), Robert Angus Smith menemukan untuk pertama kalinya hujan asam di Kota Manchester (Inggris) yang disebabkan industrialisasi pada masa revolusi industri (Mehta, 2010).

Hujan asam dapat terjadi, baik alami maupun antropogenik (hasil kegiatan manusia). Secara alami, hujan asam dapat terjadi akibat erupsi (letusan) gunung api, proses biologis dalam tanah, rawa dan laut (Agustiarni, 2008; Mehta, 2010).

Erupsi gunung api salah satunya melepaskan gas nitrogen dioksida (NO_2) dan sulfur dioksida (SO_2) yang merupakan gas-gas pembentuk air hujan asam (Sumaryati, 2014). Hujan asam terjadi jika di atmosfer terdapat bahan polutan udara berupa SO_2 dan NO_x yang bereaksi dengan H_2O (titik-titik air dalam awan) membentuk H_2SO_4 (asam sulfat) dan HNO_3 (asam nitrat).

Asam nitrat (HNO_3) berasal dari NO_x yang terjadi pada suhu tinggi di dalam mesin kendaraan bermotor. Sementara itu, SO_2 berasal dari industri, kendaraan bermotor, dan erupsi gunung api. Hujan asam berdampak negatif pada lingkungan air dan daratan. Air hujan dengan pH lebih kecil dari 5,6 akan berakibat buruk pada properti, monumen, dan ekosistem (terutama lingkungan badan air dan tanah/lahan), serta kesehatan manusia (Wardhana, 1995).

Pada properti dan material yang terbuat dari logam, hujan asam akan berdampak pada korosi (karat). Hujan asam dapat merusak material logam, meskipun sudah dilapisi (digalvanisasi) atau berbahan nikel. Bahkan, baja yang telah dicat, kayu yang dicat, dan patung juga dapat terkena korosi akibat hujan asam. (Glass et al., 1979).

Peter et al. (2018) menyatakan bahwa partikel polutan udara dan hujan asam menyebabkan korosi pada peralatan logistik dan kendaraan militer. Peralatan elektronik dapat juga terdampak oleh polutan udara karena bersifat partikel mikroskopis yang dapat merusak sirkuit dan komponen elektronik (Abbasi et al., 2013)

Air hujan asam yang meresap ke dalam tanah akan memengaruhi komposisi kimia tanah, menyebabkan *leaching* (pencucian unsur hara dalam tanah), dan mengubah pH tanah. Perubahan pH tanah dapat menyebabkan perubahan pada pola adsorbsi (penyerapan) dan desorbsi (pelepasan) kation dalam tanah.

Hujan asam dapat menurunkan pertumbuhan vegetasi dan bahkan kematian vegetasi hutan (Liu & Liptak, 1999). Cowling dan Davey (1981) menyatakan bahwa hujan asam yang jatuh di daun akan mengelupaskan lapisan lilin pada daun sehingga air hujan tidak dapat tertahan pada daun dan langsung menjadi air hujan yang menyusuri batang pohon dan berakhir menjadi air limpasan yang mengerosi tanah. Wetstone dan Foster (1983) menyatakan bahwa di Jerman terdapat kerusakan 560.000 ha hutan akibat hujan asam.

Hujan asam juga dapat menyebabkan patogen menjadi resisten, menurunkan laju penguraian sampah daun, mempercepat kematian benih, dan mengakumulasi logam berat dalam tanah (Cowling & Davey, 1981). Ditambahkan oleh Cowling dan Davey (1981) bahwa hujan asam dapat menghambat proses mikrobiologi seperti fiksasi nitrogen, mineralisasi sampah hutan, dan nitrifikasi amonium.

Hujan asam dapat menyebabkan peningkatan mobilisasi aluminium dan *leaching* dari tanah menuju sistem akuatik atau badan air seperti sungai dan danau atau waduk (danau buatan). Hujan asam ini juga dapat menggantikan asam karbonik di dalam

tanah dengan asam sulfat. Hujan asam juga dapat mempercepat pencucian kation nutrisi (unsur hara) dari tanah hutan dan dapat mengancam pengurangan sumber kalium tanah.

Hujan asam berdampak pada perubahan komposisi kimia air dan perairan yang turunannya berakibat pada flora dan fauna yang berhabitat di lingkungan perairan tersebut. Wright dan Gjessing (1976) telah mencatat bahwa hujan asam yang jatuh ke danau menyebabkan konsentrasi aluminium, mangan, dan logam berat lain meningkat tinggi. Sementara itu, Hendry et al. (1976) menyatakan bahwa hujan asam mengakibatkan penurunan jumlah dekomposer (bakteri pengurai), *algae* (ganggang), zooplankton, bentos (plankton yang terdapat di dasar perairan), dan ikan.

Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas, 2006) dalam laporannya menyatakan bahwa hujan asam atau deposisi asam telah berkontribusi sebesar 30% terhadap penurunan keanekaragaman hayati, sedangkan perubahan iklim menyumbangkan sebesar 8% untuk penurunan yang sama.

E. Dampak Polusi Udara di Perkotaan

Dampak polusi udara di kota mencakup terjadinya inversi, pulau panas perkotaan, dan potensi kejadian puting beliung. Terdapat tiga bentuk inversi pada atmosfer yaitu inversi karena radiasi, inversi karena subsiden, dan inversi frontal.

Inversi karena radiasi disebut juga dengan inversi suhu. Inversi suhu sering terjadi di kota besar. . Hal ini karena pada kondisi normal atau tidak, ada industri atau tidak, dan ada kegiatan transportasi yang bekerja *nonstop* (24 jam), pada malam hari, di permukaan kota akan terjadi pendinginan karena pelepasan radiasi gelombang panjang dari permukaan. Sebaliknya, pada kota dengan industri dan transportasi yang tidak tidur, emisi polutan udara terus diproduksi dari pabrik dan kendaraan bermotor selama 24 jam.

Cerobong asap dari pabrik dan knalpot kendaraan bermotor tidak saja melepaskan polutan udara, tetapi juga melepaskan bahan

yang bersifat panas. Dengan demikian, kota akan memiliki suhu relatif tinggi dan menjadi terasa lebih panas.

Inversi suhu berarti kondisi yang berbanding terbalik antara suhu udara di permukaan dan suhu udara di lapisan atas permukaan. Seharusnya, pada malam hari, kondisi di permukaan lebih dingin (suhu udara lebih rendah) daripada kondisi di bagian lapisan yang lebih atas. Liu dan Liptak (1999) menyatakan bahwa polutan udara yang dilepaskan selama malam hari menjadi penyebab inversi radiasi ini. Inversi radiasi ini banyak terjadi di iklim tropis dengan topografi datar atau terjadi pada kota-kota yang dibangun pada dataran rendah, seperti Jakarta, Semarang, dan Surabaya.

Inversi suhu ini dalam kurun waktu kejadian yang relatif lama akan berakibat terbentuknya pulau panas perkotaan (*urban heat island*). Tekstur kota yang bersifat halus dan sebagian besar permukaannya terbuat dari aspal dan beton menyebabkan radiasi tidak dapat diserap, tetapi sebaliknya semua radiasi dipantulkan (albedo makin besar) dan berakibat panas makin terasa. Selain itu, tekstur kota yang didominasi aspal dan beton juga tidak dapat menyerap air. Sedikit air hujan yang terserap menjadikan iklim kota bersifat kering dan panas.

Kemacetan kendaraan bermotor menyebabkan polutan udara terakumulasi di jalan beraspal sehingga menaikkan suhu udara. Kawasan dengan kondisi jalan yang macet, didominasi jalan beraspal, permukaan gedung berbeton serta kaca, sedikit ruang terbuka hijau, tidak ada badan air, baik buatan maupun alami, dan jauh dari laut, kawasan tersebut berpotensi menjadi pulau panas perkotaan.

Selain menyebabkan pulau panas perkotaan, polusi udara di kawasan perkotaan juga berpotensi menimbulkan angin puting beliung. Perbedaan suhu yang menyebabkan terjadinya selisih tekanan udara di permukaan dan lapisan di atasnya mengakibatkan terbentuknya angin berkecepatan tinggi.

Inversi subsiden terjadi pada kota yang dibangun pada cekungan topografi (Cooper & Alley, 1986, sebagaimana dikutip dalam Liu

& Liptak, 1999). Istilah subsiden mengacu pada bagian tanah yang lebih rendah atau turun. Dengan demikian, subsiden dapat diartikan sebagai lokasi dengan kondisi topografi cekung yang di sekelilingnya terdapat perbukitan atau pegunungan. Bandung, Bogor, dan Malang adalah contoh kota yang dibangun pada cekungan topografi. Ketiga kota dikelilingi oleh pegunungan sehingga kota-kota tersebut terletak lebih rendah dan berbentuk cekungan.

Polutan udara yang terkumpul di cekungan topografi tidak dapat menyebar dan terakumulasi di sekitar cekungan topografi. Sementara itu, polutan udara yang berasal dari perbukitan dan pegunungan sekitarnya menuju ke cekungan topografi. Kota yang dibangun pada cekungan topografi akan dipenuhi polutan udara, terlebih sebagian besar kota di cekungan topografi adalah daerah wisata yang banyak dikunjungi wisatawan pada akhir pekan dan libur panjang. Para wisatawan dengan kendaraan bermotornya banyak melepaskan polutan udara ke cekungan topografi ini. Akibatnya, konsentrasi polutan udara menjadi tinggi dan berbahaya bagi kesehatan. Hal ini karena polutan udara akan terakumulasi dalam jumlah relatif besar dan hanya dengan kecepatan angin relatif tinggi polutan udara di cekungan topografi dapat terdispersi baik sehingga berkonsentrasi rendah.

Inversi subsiden yang terjadi dalam periode waktu tertentu berpotensi terjadinya angin puting beliung. Selisih tekanan udara yang sangat besar antara permukaan cekungan topografi dan lapisan di atasnya dan sekelilingnya yang berupa pegunungan dan perbukitan mengakibatkan terbentuknya angin berkecepatan tinggi. Selain itu, kondisi cekungan topografi yang sangat jauh dari laut menyebabkan angin lokal (angin darat dan angin laut) tidak bekerja. Padahal, angin lokal tersebut berpotensi melemahkan kekuatan angin puting beliung.

Menurut hipotesis penulis, terjadinya angin puting beliung berdampak positif pada penyebaran polutan udara. Adanya puting beliung mengakibatkan polutan udara yang terakumulasi di cekungan topografi akan terdispersi baik sehingga berkonsentrasi

rendah dan tidak membahayakan kesehatan makhluk hidup yang tinggal di kawasan cekungan topografi tersebut. Hipotesis ini perlu dibuktikan dengan penelitian lebih lanjut karena banyak peristiwa puting beliung terjadi di Bandung yang merupakan kawasan cekungan topografi. Selain dampak berupa terjadinya angin puting beliung karena inversi subsiden, inversi jenis ini memungkinkan juga berpotensi terjadinya fenomena pulau panas perkotaan (*urban heat island*).

Inversi jenis terakhir adalah inversi frontal. Inversi ini terjadi secara alami pada daerah berlintang tinggi (iklim subtropis) dan pengaruhnya terhadap polutan udara tidak signifikan. Inversi frontal terbentuk karena bertemunya massa udara bertekanan udara tinggi dengan massa udara bertekanan rendah.

Apakah inversi frontal dapat terjadi di daerah beriklim tropis seperti Indonesia? Jawaban hipotesisnya mungkin saja. Hal ini karena, meskipun dahulu Indonesia belum pernah mengalami kejadian puting beliung yang dapat disejajarkan dengan angin *tornado* di Amerika, kontribusi polutan udara (terutama yang bersifat antropogenik) terhadap kejadian cuaca ekstrem kini makin besar. Sifat polutan udara antropogenik adalah memanaskan permukaan yang menyebabkan perbedaan tekanan udara antara di permukaan dengan lapisan di atasnya. Selisih tekanan udara yang besar ini mengakibatkan terbentuknya angin berkecepatan tinggi. Kondisi cekungan topografi juga berkontribusi untuk menjadikan konsentrasi polutan udara terakumulasi dalam jumlah besar (secara kuantitas) dan berkonsentrasi tinggi (secara kualitas) ditambah pada musim kemarau kondisi kelembapan udara yang rendah (udara menjadi kering), sehingga angin yang terbentuk berkecepatan tinggi.

F. Dampak Kebisingan

Bising adalah energi bunyi atau suara yang mengakibatkan efek buruk pada psikologi dan psikis manusia dan mungkin juga hewan dan tumbuhan (Godish, 2003). Energi bunyi dihasilkan oleh benda yang bergetar atau digetarkan. Cara menggetarkan benda dapat

dengan dipukul, dipetik, diayunkan, dilemparkan, digas, diputar, dan ditembakkan.

Kekuatan bunyi dinyatakan dengan satuan desibel (dB). Kekuatan bising dipengaruhi oleh waktu. Pada waktu malam, suara yang berfrekuensi rendah mengakibatkan bising. Sementara itu, pada siang hari, frekuensi suara yang tinggi sering kali tidak mengakibatkan bising.

Dampak dari bising adalah stres, gangguan konsentrasi berpikir, sulit tidur, dan perubahan sensitivitas atau kepekaan seseorang terhadap frekuensi bunyi yang biasa terdengar, serta gangguan kesehatan mental dan ketulian. Sebuah studi menunjukkan bahwa orang yang tinggal dekat bandara menunjukkan tendensi tekanan darah yang lebih tinggi (Godish, 2003).

Tabel 9.3 menyajikan tingkat bising dan durasi (lamanya) suara yang diperbolehkan agar tidak menimbulkan dampak buruk. Sementara itu, Tabel 9.4 menyajikan tingkat bising yang dihasilkan pada jarak antara sumber bunyi dan objek pendengar.

Tabel 9.3 Kekuatan dan Lamanya Terpapar Suara yang Diperbolehkan

No.	Derajat Kebisingan (dBA)	Maksimum Pemaparan yang Diperbolehkan (jam)
1.	85	8
2.	90	4
3.	95	2
4.	100	1
5.	105	1/2
6.	110	1/4
7.	115	1/8

Sumber: Kusnoputranto dan Susanna (2000)

Berdasarkan Tabel 9.3 dapat diketahui bahwa makin besar kekuatan bunyi atau bising, durasi paparan makin singkat agar bising tidak menimbulkan dampak buruk. Sementara itu, menurut Tabel 9.4, dapat diketahui bahwa makin jauh jarak antara sumber bunyi dan objek pendengar, kekuatan bunyi akan makin kecil.

Tabel 9.4 Kekuatan Bunyi yang Dihasilkan pada Jarak Tertentu

No.	Jarak antara Sumber Bunyi dan Objek Pendengar	Kekuatan Bunyi (dBA)
1.	0,5 m	72
2.	1 m	66
3	2 m	60
4.	3 m	56
5.	4 m	54
6.	5 m	52

Sumber: Godish (2003)

Pada hewan seperti sapi perah, dampak bising mengakibatkan produksi susu menjadi berkurang dari sisi kuantitas dan kualitas. Sementara itu, pada peternakan ayam petelur, polusi udara mengakibatkan ayam tidak dapat bertelur akibat stres.

G. Dampak Polusi Udara Berupa Bau

Dampak polusi udara yang lain adalah bau. Bau dihasilkan oleh zat polutan udara, baik organik maupun anorganik yang bersifat *volatil* (mudah menguap) atau *semivolatil*. Tabel 9.5 menyajikan batas minimum konsentrasi zat polutan udara yang berlaku di Indonesia dan menghasilkan bau tidak sedap. Bau tidak enak akan tercium jika konsentrasi polutan udara lebih besar daripada nilai batas yang tercantum pada Tabel 9.5. Dampak dari bau akan berpengaruh pada psikologis manusia.

Tabel 9.5 Konsentrasi Minimal Ambien Zat Polutan Udara yang Menghasilkan Bau

No.	Polutan Udara	Nilai Batas (ppm)	Metode Pengukuran	Peralatan
1.	Amoniak (NH_3)	2,0	Indofenol	Spektro-fotometer
2.	Metil Merkaptan (CH_3SH)	0,002	Absorbsi gas	Gas kromato-graf

No.	Polutan Udara	Nilai Batas (ppm)	Metode Pengukuran	Peralatan
3.	Hidrogen sulfida (H_2S)	0,02	Merkuri tiosi-anat, absorbsi gas	Spektro-fotometer
4.	Metil sulfida $(CH_3)_2S$	0,01	Absorbsi gas	Gas kromato-graf
5.	Stirena	0,1	Absorbsi gas	Gas kromato-graf

Sumber: Yuwono (2008)

H. Dampak Polusi Cahaya

Polusi cahaya adalah penggunaan cahaya buatan berlebih atau tidak tepat penggunaannya yang dihasilkan oleh peradaban manusia modern, berdampak pada kehidupan, dan termasuk bentuk polusi (Priyantikanto et al., 2019). Hal ini karena polusi cahaya telah nyata menimbulkan dampak pada makhluk hidup dan lingkungannya dengan akibat yang tidak terduga (Rajkhowa, 2014).

Polusi cahaya tidak berarti cahaya yang mendapat efek pencemaran, tetapi cahaya itu sendiri yang menjadi sumber polutan bagi makhluk hidup dan lingkungannya (Nurfarida et al., 2017).

Tidak seperti pada polusi udara karena zat kimia yang ditemui hampir 24 jam, polusi cahaya hanya ditemui pada malam hari. Banyak pencahayaan di luar ruangan pada malam hari bersifat tidak efisien (terlalu terang dan boros energi) dan tidak efektif (tidak tepat sasaran dan tidak diperlukan), tetapi malahan menimbulkan polusi cahaya.

Polusi cahaya dikategorikan menjadi dua, yaitu cahaya yang mengganggu dan cahaya yang berlebihan (Raisal, 2020). Seperti pada polusi udara karena zat kimia, polusi cahaya berdasarkan lokasinya dibedakan menjadi polusi cahaya *indoor* dan *outdoor*. Bentuk polusi cahaya meliputi *glare* atau silau (cahaya latar belakang yang terlalu banyak); *sky glow* (langit terlalu terang yang berasal

dari lampu-lampu penerangan dari wilayah padat penduduk); *light treepass* (cahaya yang jatuh di tempat yang tidak diinginkan atau tidak dibutuhkan); *light clutter* (cahaya yang dapat menyebabkan gangguan penglihatan); *over illumination* (cahaya berlebih) (Prastyo & Herdiwijaya, 2018).

Glare ini berupa cahaya terang yang bersinar langsung dan mengenai mata sehingga menyilaukan dan dapat menyebabkan pusing (Walker et al., 2010). Sementara itu, *sky glow* sangat mengganggu para pengamat antariksa dan astronom saat melihat benda langit. Hal ini disebabkan *sky glow* membuat langit terang sehingga mengurangi kontras di langit dan tidak mungkin untuk melihat bintang paling terang (Rajkhowa, 2014). Terakhir, *light clutter* adalah pengelompokan lampu yang berlebih yang dapat menimbulkan kebingungan, membuat tidak fokus, dan mengurangi konsentrasi pengendara kendaraan bermotor sehingga berpotensi menyebabkan kecelakaan.

Polusi cahaya berdampak pada visibilitas (jangkauan melihat), makhluk hidup (manusia, hewan, tumbuhan), dan lingkungannya. Dampak visibilitas dari polusi cahaya berbeda dengan dampak visibilitas pada polusi udara karena zat kimia. Penurunan visibilitas karena dampak polusi cahaya adalah berupa penurunan daya melihat bintang, bulan, dan benda langit lain pada malam hari, terutama untuk penelitian antariksa dan astronomi; penentuan awal bulan Ramadhan; awal bulan Syawal; wukuf di Arafah pada 9 Zulhijah; dan Idul Adha pada 10 Zulhijah. Polusi cahaya menyebabkan pengamat tidak dapat melihat kondisi bintang sebenarnya atau posisi hilal dari bulan yang akan memengaruhi hasil observasi antariksa atau kesalahan fatal dalam penentuan awal bulan Ramadhan dan Syawal.

Dampak polusi cahaya bagi manusia, selain penurunan visibilitas, juga berupa dampak langsung yang memengaruhi kesehatan serta dampak tidak langsung berupa keberlanjutan kehidupan manusia yang sangat tergantung pada hewan dan tumbuhan sebagai pangannya. Pencahayaan berlebih atau komposisi spektrum cahaya yang tidak tepat akan berdampak pada kesehatan berupa gejala sakit kepala, mual, kelelahan bekerja, stres, penurunan

fungsi seksual, peningkatan kecemasan, dan kesehatan retina (Rajkhowa, 2014).

Penemuan teknologi lampu *light emitting diode* (LED) dengan memancarkan cahaya putih terang ternyata dapat memengaruhi fisiologi retina yang mendorong kematian sel dan dapat mengakibatkan kebutaan serta desinkronisasi (Contin, 2016). Pauley (2004) menambahkan bahwa bahwa kanker payudara dan kanker kolorektal adalah dua jenis kanker yang dapat ditimbulkan oleh polusi cahaya.

Dampak polusi cahaya pada hewan dapat mengacaukan navigasi (pola jelajah) hewan terutama hewan *nocturnal* (hewan yang aktivitas dominannya dilakukan pada malam hari), mengganggu hubungan interaksi antar*predator* (pemangsa) dan *prey* (mangsa), dan memengaruhi fisiologi hewan.

Polusi cahaya menyebabkan spesies burung yang terdapat di Amerika Utara dibuat kebingungan oleh bangunan yang terang benderang dan menara komunikasi ketika bermigrasi pada malam hari. Navigasi burung yang menggunakan cakrawala sebagai orientasi tujuan migrasinya terganggu oleh pencahayaan berlebih di langit. Berbeda dengan yang terjadi di New York, sekitar 10.000 ekor burung yang melakukan migrasi terluka atau terbunuh karena menabrak gedung pencakar langit dan gedung bertingkat tinggi (Chepesiuk, 2014). Menurut Raisal (2020), beberapa bukti menunjukkan bahwa pencahayaan malam buatan memengaruhi pilihan lokasi sarang pada burung.

Disorientasi juga dialami kura-kura yang selalu menghindari kondisi tempat yang terang benderang (mengalami polusi cahaya) untuk sarang bertelur. Akibatnya, kura-kura susah mencari tempat untuk bertelur dan tersasar ke jalan raya terdekat yang berisiko tertabrak kendaraan (Chepesiuk, 2014). Pengembangan pantai-pantai sebagai objek wisata bahari mengakibatkan di sekitar pantai didirikan penginapan yang dilengkapi gemerlap lampu terang benderang dan sebagai sumber polusi cahaya yang mengganggu

aktivitas kura-kura dan keberlangsungan hidup kura-kura (karena tidak dapat bertelur pada tempat yang berlebih cahaya).

Pengembangan hutan bakau (kawasan mangrove) selain sebagai objek wisata bahari juga untuk tujuan konservasi yang dilengkapi rumah makan dan penginapan bertaburan lampu terang (cahaya putih) turut mengganggu aktivitas ikan. Hutan mangrove adalah habitat ikan dan merupakan tempat *nursery* (bertelur, menetas, dan perawatan ikan-ikan kecil). Ikan menghindari sumber cahaya putih. Cahaya putih mengganggu perilaku alami ikan. Jika ikan terpapar oleh cahaya lampu putih berlebih dalam waktu lama, maka akan berakibat pada kerusakan mata ikan (Rajkhowa, 2014). Terganggunya keberadaan ikan di laut karena polusi cahaya akan berakibat pada penangkapan ikan oleh nelayan menjadi turun dan menyebabkan harga ikan melonjak dan pendapatan nelayan menurun. Pengamatan menunjukkan bahwa jumlah rata-rata penampakan dan penangkapan ikan lebih besar di bawah cahaya merah daripada cahaya putih. Hal ini pula yang menjadi alasan nelayan menangkap ikan di laut pada malam hari. Selain terbantu oleh angin darat yang membawa nelayan berlayar ke tengah laut mencari ikan, ikan juga cenderung menampakkan diri pada malam hari.

Polusi cahaya juga berdampak pada kemampuan navigasi hewan serangga *nocturnal* seperti kumbang, ngengat, jangkrik, dan laba-laba. Serangga jenis ngengat membantu penyerbukan bunga yang dilakukan pada malam hari. Polusi cahaya membuat ngengat tidak mengetahui jalan untuk melakukan penyerbukan (disorientasi) sehingga bunga tidak diserbuk dan bunga tidak dapat melakukan regenerasi (reproduksi dan berkembang biak). Dalam waktu yang lama, tanaman dengan bunga yang tidak mengalami penyerbukan lama-kelamaan akan punah (Rajkhowa, 2014).

Polusi cahaya selain berdampak pada gangguan navigasi juga terganggunya siklus ritme irama alam yang disebut keberkalaan (Supriatin, 2014). Keberkalaan berdasarkan periode waktu dikelompokkan menjadi ritme irama tahunan (fenologi), ritme irama

bulanan kamariah (revolusi bulan mengelilingi bumi) berperiode 28 hari, ritme irama pasang-surut berperiode 12,8 jam, dan ritme irama piantan berperiode 24 jam yang disebut sirkadian (Ewusie, 1990). Hewan memiliki kemampuan untuk menentukan waktu. Polusi cahaya mengakibatkan hewan menduga malam hari menjadi siang hari sehingga dapat mengganggu metabolisme dan fisiologi hewan. Polusi cahaya juga dapat menyebabkan terganggunya kesehatan burung dengan cara mengganggu ritme sirkadian dari burung. Gangguan ritme sirkadian tersebut akan menghambat pelepasan melatonin dan mengubah mikrobiota usus pada burung (Jiang et al., 2020).

Dampak polusi cahaya lain adalah pada hewan kunang-kunang. Kunang-kunang termasuk hewan *nocturnal* yang tubuhnya memiliki dan memancarkan cahaya sendiri di tempat gelap. Banyak lokasi yang mengalami polusi cahaya menyebabkan terganggunya metabolisme kunang-kunang terkait produksi cahaya. Metabolisme dan fisiologi kunang- kunang yang terganggu dalam waktu yang lama mengakibatkan kematian kunang-kunang atau bermigrasi ke tempat yang belum terjadi polusi cahaya. Ketika masa reproduksi (masa kawin), kunang-kunang jantan akan memancarkan cahaya yang lebih kuat untuk menarik lawan jenis (kunang-kunang betina). Polusi cahaya mengakibatkan cahaya yang dipancarkan kunang-kunang menjadi kalah sehingga masa kawin kunang-kunang terhambat. Jika polusi cahaya terjadi terus-menerus, populasi kunang-kunang bahkan berpotensi punah.

Kepunahan salah satu jenis hewan akan berdampak pada hubungan mangsa (*prey*) dan pemangsa (*predator*). Jika suatu hewan menjadi pemangsa, kepunahan hewan tersebut akan mengakibatkan populasi mangsa (*prey*) makin melimpah. Sebaliknya, jika hewan tersebut adalah *prey*, kepunahan hewan tersebut akan mengakibatkan hewan pemangsa juga populasinya makin sedikit. Kasus melimpahnya populasi belalang atau ulat yang menyerbu suatu lokasi dapat saja disebabkan dan dianalisis dari sisi polusi cahaya. Kematian atau punahnya salah satu *prey* atau *predator* akan

mengakibatkan jaring makanan, rantai makanan, dan keseimbangan alam terganggu.

Polusi cahaya juga berdampak pada tumbuhan. Berdasarkan panjang hari dan lama penyinaran matahari, tumbuhan dikelompokkan menjadi tumbuhan berhari panjang (memerlukan lama penyinaran lebih dari 12 jam atau membutuhkan waktu malam lebih pendek dan waktu siang lebih panjang), tumbuhan berhari pendek (memerlukan lama penyinaran kurang dari 12 jam atau membutuhkan waktu malam yang lebih panjang), dan tumbuhan netral (memerlukan lama penyinaran 12 jam). Polusi cahaya secara tidak langsung berdampak pada metabolisme dan fisiologi tumbuhan berhari pendek. Polusi cahaya akan berdampak positif pada tumbuhan berhari panjang terutama di daerah iklim tropis.

I. Penutup

Polusi udara adalah pencemaran yang terjadi di udara. Polusi udara didefinisikan sebagai masuknya atau dimasukkannya zat dan energi, baik secara alami maupun buatan sehingga terjadi penurunan fungsi lingkungan atau berdampak penting pada makhluk hidup dan lingkungannya. Berdasarkan definisi tersebut, polusi udara pada tulisan ini meliputi polusi udara karena zat kimia, energi suara atau bunyi yang berlebih, dan energi cahaya yang berlebih.

Baik polusi udara alami maupun buatan yang memiliki konsentrasi kimia polutan udara tinggi atau suara yang sangat keras atau cahaya yang berlebih akan berdampak pada makhluk hidup dan lingkungan, yang tidak saja lingkungan udara (atmosfer), tetapi juga polusi udara zat kimia akan berdampak pada lingkungan perairan (badan air dan laut) serta lingkungan darat (tanah). Dampak polutan udara bersifat langsung mengenai objek yang selalu terpapar atau tidak langsung yang memerlukan waktu lama dari terpapar sampai menimbulkan dampak buruk yang berpengaruh pada kesehatan.

Sebagian besar dampak polutan udara adalah pada kesehatan (karena polusi udara zat kimia, polusi cahaya, dan bising), visibilitas (polusi udara zat kimia dan polusi cahaya), dan keanekaragaman

hayati (polusi udara zat kimia dan polusi cahaya). Selain itu, polusi udara zat kimia dapat berkontribusi pada perubahan cuaca dan iklim. Oleh karena itu, sudah saatnya dilakukan mitigasi untuk mengurangi sumber polusi udara.

Keikutsertaan pihak swasta dalam pembuatan beberapa taman kota pada area jalan yang macet dapat bermanfaat untuk menyerap polutan yang diemisikan oleh kendaraan bermotor yang merupakan produk pabrikan dari pihak swasta tersebut. Pemerintah dengan kebijakan bahan bakar gas untuk rumah tangga, transportasi beroperasi *on line* (sesuai pesanan dan aplikasi), mengadakan transportasi publik (*Mass Rapid Transit*), program kendaraan bermotor berbahan bakar listrik, kebijakan ganjil-genap adalah beberapa langkah nyata dari pemerintah untuk mengurangi emisi polutan udara.

Transportasi *on line* adalah salah satu cara untuk tidak terjadinya penumpukan kendaraan umum yang beroperasi yang dapat berakibat macet, pemborosan bahan bakar minyak, dan polusi udara. Pemberlakuan konsep eksternalitas bagi pelaku industri, pemakai kendaraan bermotor, dan pemilik penginapan dapat dicobakan. Para pelaku ini harus membayar biaya dampak lingkungan yang terdegradasi kepada objek terkena dampak. Penegakan hukum harus dijalankan tanpa pandang bulu sehingga pelaku pencemar jera dan tidak mengulangi.

Daftar Pustaka

Abbasi, S., Sellgren, U., & Olofsson, U. (2013). Technical note: Experiences of studying airborne wear particles from road and rail transport. *Aerosol and Air Quality Research*, *13*(4), 1161–1169. https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.10.0295

Agustiarni, Y. (2008). *Pengaruh hutan kota dalam mengurangi hujan asam di kawasan industri: Studi kasus di Kawasan Industri Medan, Kelurahan Malabar, Kecamatan Medan Deli, Medan* [Skripsi, Universitas Sumatra Utara].

Alfiandy, S., Permana, D. S., Nugraha, M. S., & Putri, I. J. A. (2021). Analisis kimia dan kualitas air hujan di Kota Palu sebagai penyebab terjadinya hujan asam. *Jurnal Riset Kimia*, *10-18*. https://doi.org/10.25077/jrk.v12i1.36

Anandari, A. A., Wadjdi, 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.

A'yuna, I. Q., & Umaroh, R. (2022). Polusi udara dalam ruangan dan kondisi kesehatan: Analisis rumah tangga Indonesia. *Jurnal Ekonomi dan Pembangunan Indonesia*, *22*(1), 16–26.

Badan Perencanaan Pembangunan Nasional. (2006). *Strategi dan rencana aksi nasional untuk peningkatan kualitas udara perkotaan*.

Barker, J. R., & Tingey, D. T. (1992). The effect of air pollution on biodiversity: A synopsis. Dalam J. R. Barker & D. T. Tingey (Eds.), *Air pollution effects on biodiversity* (hlm. 3–8). Van Nostrand Reinhold.

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*, Article 111621. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111621

Chepesiuk, R. (2009). Missing the dark: Health effects of light pollution. *Environmental Health Perspectives,* 117(1), A20–A27.

Contín, M. A., Benedetto, M. M., Quinteros-Quintana, M. L., & Guido, M. E. (2016). Light pollution: The possible consequences of excessive illumination on retina. *Eye*, 30, 255–263. https://doi.org/10.1038/eye.2015.221

Cooper, C. D., & Alley, F. C. (1986). *Air pollution control: A design approach*. Waveland Press.

Cowling, E. B., & Davey, C. B. (1981). Acid precipitation: Basic principles and ecological consequence. *Pulp and Paper*, *55*(8), 182–185.

Ewusie, J. Y. (1990). *Pengantar ekologi tropika*. ITB Press.

Fath, M. A. (2021). Literature review: Pengaruh kualitas udara dan kondisi iklim terhadap perekonomian masyarakat. *Media Gizi Kesmas*, *10*(2), 329–342.

Glass, N. R., Glass, G. E., & Rennie, P. J. (1979). Effect of acid precipitation. *Environmental Science and Technology*, *13*(11), 1350–1352.

Godish, T. (2003). *Air quality* (4th ed.). Lewis Publishers.

Graves, J., & Reavey, D. (1996). *Global environmental change: Plants, animals, and communities*. Longman.

Hendrey, G. R., K. Baalsrud, T. S. Traaen, M. Laake, & G. Raddum. (1976). Acid precipitation: Some hydrobiological changes. *Ambio*, 5(5), 224–227.

Hourani, L. L., Williams, T. V., & Kress, A. M. (2006). Stress, mental health, and job performance among active duty military personnel: Findings from the 2002 Department of Defense Health Related Behaviors Survey. *Military Medicine*, *171*(9), 849–856. https://doi.org/10.7205/MILMED.171.9.849

Iffani, W., Astuti, E. S., & Anjaswarni, T. (2019). Global warming dan climate change hubungannya dengan vektor borne diseases. Dalam *Ekologi, pemanasan global dan kesehatan*. Aseni.

Ivanova, V. R. (2020). The anthropogenic air pollution and human health. *Journal of IMAB Annual Proceeding Scientific Papers,* 26(2), 3057–3062. https://doi.org/10.5272/jimab.2020262.3057

Jiang, J., Y. He, H. Kou, Z. Ju, X. Gao, & H. Zhao. (2020). The effects of artificial light at night on Eurasian tree sparrow (*Passer montanus*): Behavioral rhythm disruption, melatonin suppression and intestinal microbiota alterations. *Ecological Indicators,* 108, Article 105702. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105702

Kusnoputranto, H., & Susanna, D. (2000). *Kesehatan lingkungan*. Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Indonesia.

Liu, D. H. F., & Liptak, B. G. (1999). *Air pollution*. Lewis Publishers.

Madigan, M. T., Martinko, J., Dunlap, P. V., & Clark, D. P. (2009). Brock biology of microorganisms (12th ed.). Pearson/Benjamin Cummings. San Francisco. 1061 pages.

Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health*, *8*, Article 14. https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014

Mehta, P. (2010). Science behind acid rain: Analysis of its impact and advantages on life and heritage structure. *South Asian Journal of Tourism and Heritage*, *3*(2), 123–132.

Nurfarida, L., Yusup, P. M., & Komariah, N. (2017). Tingkat pengetahuan masyarakat sekitar Observatorium Bosscha Lembang mengenai polusi cahaya. *Jurnal Kajian Informasi & Perpustakaan*, *5*(1), 13–22. https://doi.org/10.24198/jkip.v5i1.11327

Pauley, S. M. (2004). Lighting for the human circadian clock: Recent research indicates that lighting has become a public health issue. *Medical Hypotheses*, *63*(4), 588–596. https://doi.org/10.1016/j.mehy.2004.03.020

Pratama, R., & Parinduri, L. (2019). Penanggulangan pemanasan global. *Buletin Utama Teknologi*, *15*(1), 91–95.

Prastyo, H. A., & Herdiwijaya, D. (2018). Analisis dinamika polusi cahaya di sekitar Observatorium Bosscha berdasarkan citra satelit VIIRS-DNB. *Proseding Seminar Nasional Penginderaan Jauh ke-5 Tahun 2018*. Pusat Teknologi dan Data Penginderaan Jauh (Pustekdata), LAPAN. 1–9.

Priyatikanto, R., A. G. Admiranto, G. P. Putri, Elyyani, S. Maryam, & N. Suryana. (2019). Map of sky brightness over Greater Bandung and the prospect of astro tourism. *Indonesian Journal of Geography,* 51(2), 190–198. DOI: http://dx.doi.org/10.22146/ijg.43410

Puspitasari, R. D., & Fauziah, S. (2023). *Faktor risiko pencemaran udara terhadap kesehatan di Indonesia*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/375112234

Raisal, A. Y., Pramudya, Y., Okimustava, & Muchlas. (2017). The moon phases influence on the beginning of astronomical dawn determination in Yogyakarta. *International Journal of Science and Applied Science: Conference Series*, *2*(1), 1–7.

Raisal, A. Y. (2020). Polusi cahaya dan pengaruhnya terhadap kehidupan. *Prosiding Observatorium dan Astronomi Islam.* 1(1). 1–12

Rajkhowa, R. (2014). Light pollution and impact of light pollution. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, *3*(10), 861–867.

Richard, E. S., Williams, S. N., & Huebert, B. (1987). Annual contribution of SO2 to the atmosphere by volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *33*, 1–8.

Sawyer, G. M., Salerno, G. G., Le Blond, J. S., Martin, R. S., Spampinato, L., Roberts, T. J., Macher, T. A., Witt, M. L. I., Tsanev, V. I., & Oppenheimer, C. (2008). Gas and aerosol emissions from Villarrica Volcano, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *203*, 62–75.

Soedomo, M. (2001). *Pencemaran udara*. ITB Press.

Sumaryati. (2014). Mixing height di atas gunung api di Sumatra terkait dengan penyebaran SO_2 vertikal. *Jurnal Lingkungan Tropis*, *8*(1), 39–47.

Supriatin, L. S. (2014a). Potensi emisi metana akibat banjir. B*erita Dirgantara,* 15(1), 27–32.

Supriatin, L. S. (2014). *Sistem pertanian padi sawah berkelanjutan pada iklim tropika basah* [Disertasi, Universitas Indonesia].

Supriatin, L. S. (2017). Konsep daerah aliran udara erupsi gunung api dan aplikasinya. *Berita Dirgantara*, *18*(1). *(1), 37–42.*

Torjesen, I. (2015). Even low levels of air pollution are linked to more deaths in over 65s, study finds. *BMJ*, *350*, Article h3043. https://doi.org/10.1136/bmj.h3043

Undang-Undang Nomor 4 Tahun 1982 tentang Ketentuan-Ketentuan Pokok Pengelolaan Lingkungan Hidup.

United States Geological Survey. (2010). *Volcanic gases*. https://volcanoes.usgs.gov/hazards/gas/index.php

Walker, C. E., Pompea, S. M., Sparks, R. T., & Dokter, E. (2010). Teaching illumination engineering using light pollution education kits. *Proceedings of SPIE: Optics Education and Outreach*, 7783, 1–11. https://doi.org/10.1117/12.862713

Wardhana, W. (1995). *Dampak pencemaran lingkungan*. Andi Offset.

Wetstone, G. S., & Foster, S. A. (1983). Acid precipitation: What is it doing to our forests? *Environment*, *25*(4), 10–12, 38–40.

Wihardjo, R. S. D., & Rahmayanti, H. (2021). *Pendidikan lingkungan hidup*. Penerbit NEM.

Wright, R. F., & Gjessing, E. T. (1976). Acid precipitation: Changes in the chemical composition of lakes. *Ambio*, *5*(5), 219–224.

Yuwono, A. S. (2008). *Kuantifikasi bau dan polusi bau di Indonesia*. Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, IPB.

Zhang, Y., Yang, P., Gao, Y., Leung, R. B., & Bell, M. L. (2020). Health and economic impacts of air pollution induced by weather extremes over the continental U.S. *Environment International*, *143*, Article 105921. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105921

Bab X
Model Polusi Udara

Prawira Yudha Kombara dan Amalia Nurlatifah

Polusi udara merupakan kondisi udara yang tercemar oleh zat atau benda asing seperti partikel debu atau gas sehingga udara menjadi tidak layak dihirup oleh makhluk hidup. Udara yang tercemar sangat berbahaya bagi kelangsungan hidup manusia sehingga perlu ditanggulangi secara saksama.

Penanggulangan polusi udara dilakukan dengan beberapa hal mulai dari tahap penelitian secara ilmiah hingga pelaksanaan di lapangan. Dalam tahap penelitian, penanggulangan polusi udara dimulai dari pengumpulan data untuk mengetahui bagaimana pola dari polusi udara yang terjadi. Pengumpulan data dapat dilakukan dengan menempatkan alat pemantau atau pengukur polusi udara di titik-titik yang biasanya terjadi polusi udara. Hanya saja, untuk menempatkan alat pengukur di banyak titik masih menjadi masalah

P. Y. Kombara & A. Nurlatifah
Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: praw005@brin.go.id

© 2026 Editor & Penulis

Kombara, P. Y., & Nurlatifah, A. (2026). Model Polusi Udara. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (213–226). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1814
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

karena mahalnya harga alat pemantau dan kurangnya sumber daya manusia untuk melakukan pemasangan dan perawatan. Selain pemasangan alat pemantau, penelitian untuk mempelajari polusi udara dapat juga memanfaatkan aplikasi atau perangkat lunak yang disebut model polusi udara.

Model polusi udara merupakan aplikasi atau perangkat lunak komputer yang berfungsi untuk menyimulasikan polusi udara, baik itu pergerakan maupun reaksinya ketika berada di atmosfer. Simulasi yang dihasilkan dapat berupa proses terjadinya polusi udara, pola penyebarannya, dan sumber polusi udara tersebut. Model polusi udara ini berisikan program-program komputer yang tersusun dari persamaan-persamaan matematis, fisika, dan kimia. Selain itu, karena polusi udara sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca, model polusi udara yang kompleks biasanya turut memanfaatkan perhitungan kondisi cuaca untuk menyimulasikan proses penyebarannya di atmosfer. Pemodelan polusi udara dapat memberikan deskripsi hubungan kausal antara emisi, kondisi cuaca, konsentrasi polutan di atmosfer, deposisi, dan faktor lainnya sehingga dampaknya terhadap lingkungan dapat diperkirakan, dikuantifikasi, dan diprediksi.

Berdasarkan data masukan kondisi cuaca dan informasi sumber seperti kecepatan emisi dan ketinggian cerobong, model polusi udara memberikan karakterisasi polutan primer yang teremisi secara langsung ke atmosfer, dan untuk beberapa kasus, polutan sekunder yang terbentuk akibat hasil reaksi tersebut juga dapat diperkirakan. Model ini sangat penting untuk keperluan manajemen kualitas udara karena dapat digunakan oleh badan atau lembaga yang memiliki wewenang dan tugas dalam mengendalikan polusi udara.

Aplikasi dari model polusi udara di antaranya adalah untuk memperkirakan kontribusi sumber emisi secara langsung. Selain itu, model ini juga digunakan untuk memperkirakan strategi efektif guna mengurangi polusi udara tersebut. Dengan penggunaan model polusi udara, biaya perawatan dan pengadaan alat dapat ditekan sehingga wilayah-wilayah yang tidak memungkinkan pemasangan

alat pengamatan dapat dijangkau dan diketahui kondisi polusi udaranya.

Model polusi udara saat ini ada yang berbayar dan ada juga yang gratis. Baik yang berbayar maupun yang gratis, masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Hanya saja secara umum, model polusi udara terdiri atas dua jenis pendekatan, yakni pendekatan Lagrangian dan pendekatan Eulerian.

A. Pendekatan yang Digunakan Pemodelan Polusi Udara

Terdapat dua macam pendekatan pemodelan polusi udara yaitu pendekatan Lagrangian dan pemodelan Eulerian. Tiap-tiap pendekatan memiliki kelebihan dan kekurangannya, sehingga pemilihannya bergantung pada kebutuhan pengguna.

1. Pendekatan Lagrangian

Pendekatan Lagrangian dalam model polusi udara sudah digunakan sejak lama. Dalam pendekatan Lagrangian, parsel udara (atau *puff*) bergerak dan dilihat di sepanjang lintasan. Parsel udara merupakan cara melihat sekumpulan udara yang dibayangkan dalam bentuk kotak agar mudah dipahami. Akan tetapi, pada dasarny parsel udara ini tersusun atas sekumpulan volume udara yang terdiri atas banyak molekul udara. Selanjutnya, pada kondisi ini, *puff* diasumsikan mempertahankan kondisinya selama jalur pergerakannya (Leel et al., 2016). Dengan demikian, perspektif Lagrangian adalah cara alami untuk menggambarkan gerak benda padat. Sebagai contoh, sebuah apel jatuh dari pohonnya.

Model dengan pendekatan Lagrangian membutuhkan sumber daya yang tidak terlalu besar sehingga cocok digunakan pada perangkat dengan kemampuan terbatas seperti laptop atau komputer sehari-hari. Karena terbatasnya persamaan yang digunakan, metode perhitungannya lebih sederhana, dan waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan perhitungannya pun tergolong cukup cepat (Hu, 2015). Biasanya, model-model yang menggunakan pendekatan

Lagrangian hanya membutuhkan data masukan kondisi cuaca berupa parameter angin, baik itu arah maupun kecepatannya.

Saat ini, sudah ada beberapa model polusi udara yang memanfaatkan pendekatan Lagrangian untuk menyimulasikan bagaimana polusi udara menyebar di atmosfer.

a. Model AERMOD

AERMOD adalah *Gaussien plume* model yang menerapkan kondisi *steady-state*. Model ini menggunakan medan angin tunggal untuk menyimulasikan pergerakan emisi di udara. Medan angin berasal dari permukaan, udara atas, dan data observasi meteorologi. AERMOD juga mengombinasikan data geofisika seperti data elevasi dan tata guna lahan dengan data meteorologi untuk memperoleh parameter lapisan batas seperti ketinggian lapisan pencampuran, tingkat stabilitas atmosfer, dan turbulensi.

AERMOD ini merupakan jenis model polusi udara yang berbayar, sehingga untuk mendapatkan fitur secara lengkap kita harus berlangganan lisensi dari model ini. Untuk penjelasan dan tempat mengunduh aplikasi model ini dapat diakses pada laman berikut: https://www.weblakes.com/software/air-dispersion/aermod-view/. Aplikasi AERMOD ini merupakan aplikasi yang umum digunakan oleh lembaga pemerintah untuk bidang lingkungan hidup di Amerika Serikat (US EPA).

b. CALPUFF

CALPUFF adalah *Gaussian plume* model yang menerapkan kondisi *non-steady-state*. Keuntungan dari penggunaan model ini dibandingkan model *Gaussian* yang lain adalah model ini dapat secara realistis menyimulasikan perpindahan substransi pada kondisi *calm* ataupun, topografi yang kompleks, dan di area pantai dengan kondisi adanya angin darat dan laut.

CALPUFF direkomendasikan untuk simulasi *long-range transport* dan studi yang melibatkan asesmen dampak *plume*. Dengan pengembangan VISTAS Versi 6, CALPUFF dapat digunakan untuk keperluan simulasi, baik *long-range* maupun *short-range*.

Seperti halnya model AERMOD, model CALPUFF ini juga sering digunakan oleh US EPA. Aplikasi ini diunduh dengan mengaksesnya pada laman berikut: https://www.src.com/.

c. *The Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT) Model

HYSPLIT merupakan satu unit model yang lengkap untuk menyimulasikan trajektori parsel udara khususnya polutan, baik itu arah penyebarannya, perubahan kimia, maupun perpindahannya di atmosfer. Pada versi-versi awal, model HYSPLIT ini hanya murni menggunakan pendekatan Lagrangian sebagai inti perhitungan simulasinya, tetapi pada versi yang terbaru seperti sekarang ini, HYSPLIT sudah mengadopsi pendekatan Eulerian untuk melengkapi perhitungan simulasinya. Oleh karena itu, selain menampilkan hasil simulasi trajektori polutan, kini trajektori polutan tersebut dapat disajikan dalam bentuk grid atau pixel. Penyajian tampilan dalam bentuk grid atau pixel akan menambah informasi akurasi dari hasil simulasi yang diperoleh.

Seperti kedua model sebelumnya, model HYSPLIT ini juga membutuhkan *input* data kondisi cuaca khususnya kecepatan dan arah angin di permukaan. Sumber data angin ini dapat menggunakan data prediksi global atau regional. Model HYSPLIT dikembangkan oleh tim laboratorium *National Oceanic and Atmosphere Administration* (NOAA) di Amerika Serikat. Saat ini, model HYSPLIT disediakan dalam bentuk aplikasi sendiri yang dapat diunduh dan diinstal di perangkat pengguna atau menjalankannya di versi *web*. Untuk mengunduh atau menjalankannya pada versi *web*, laman berikut dapat dikunjungi https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php.

Model HYSPLIT ini dapat digunakan untuk menyimulasikan atau memprediksi trajektori polutan seperti dari kebakaran hutan dan lahan, letusan gunung api, atau kebakaran di satu titik tertentu. Selain data arah dan kecepatan angin, model HYSPLIT juga membutuhkan data koordinat dari lokasi atau titik yang ingin disimulasikan oleh trajektori polutan. Contoh dari penggunaan

model HYSPLIT dapat dilihat pada Keterangan: (a) pukul 07 WIB, (b) pukul 19 WIB, tanggal 01 Maret 2021 (c) pukul 07 WIB, (d) pukul 19 WIB, tanggal 02 Maret 2021 (e) pukul 07 WIB, dan (f) pukul 19 WIB

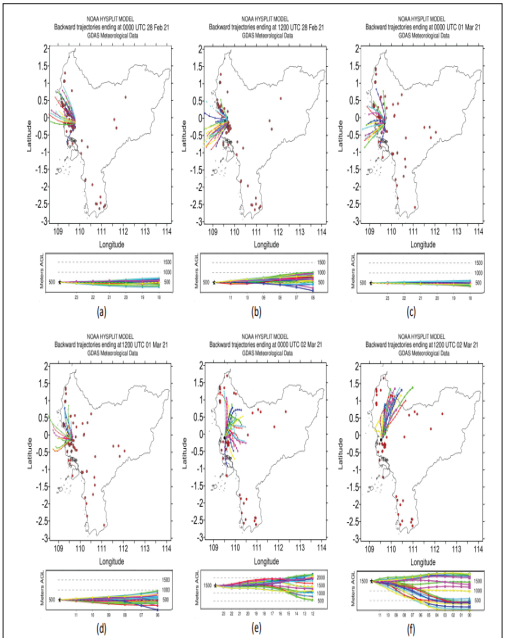


Fig. 5. The calculated trajectories of pollutants toward Pontianak projected using HYSPLIT on 28 February 2021 at (a) 07 LT, (b) 19 LT; on 1 March 2021 at (c) 07 LT, (d) 19 LT; on 2 March 2021 at (e) 07 LT, (f) 19 LT. The trajectories incorporated with movement in altitude along the time.

Keterangan: (a) pukul 07 WIB, (b) pukul 19 WIB, tanggal 01 Maret 2021 (c) pukul 07 WIB, (d) pukul 19 WIB, tanggal 02 Maret 2021 (e) pukul 07 WIB, dan (f) pukul 19 WIB

Sumber: Cholianawati et al. (2024)

Gambar 10.1 Contoh Hasil Simulasi Trajektori Polutan dengan Menggunakan Model HYSPLIT di Wilayah Pontianak, Kalimantan Barat pada tanggal 28 Februari 2021

2. Pendekatan Eulerian

Model polusi yang menggunakan pendekatan Eulerian mengadopsi sistem grid dalam satu set koordinat ortogonal untuk mendefinisikan atau menjelaskan proses atmosfer (adveksi dan difusi), sumber

emisi, dan proses kimia, serta destruksi. Dalam pemodelan Eulerian, area yang diteliti dan dilihat dibagi menjadi sel-sel grid atau pixel, baik dalam arah vertikal maupun horizontal.

Karena memanfaatkan sistem grid dan koordinat bumi, model polusi yang menggunakan pendekatan Eulerian memungkinkan untuk melakukan perhitungan proses fisis dan kimia yang terjadi pada parsel udara karena polusi. Secara umum, pendekatan Eulerian mengadopsi penyelesaian persamaan-persamaan fisika dan kimia secara numerik (Leel et al., 2016).

Model polusi yang menggunakan pendekatan Eulerian membutuhkan sumber daya komputasi yang banyak. Hal itu karena banyaknya persamaan yang harus dihitung dan diselesaikan. Biasanya, model-model tersebut diinstal pada komputer yang besar seperti superkomputer atau *server*. Area yang menjadi kajian biasanya mulai dari skala global hingga skala perkotaan. Umumnya, model polusi dengan pendekatan Eulerian memiliki komunitas untuk pengembangan modelnya sehingga banyak dari model tersebut yang tidak berbayar.

Model polusi dengan pendekatan Eulerian tetap membutuhkan data masukan kondisi atmosfer, tetapi biasanya selain parameter arah dan kecepatan angin, parameter lain seperti temperatur, kelembapan, tekanan, dan curah hujan dapat dijadikan sebagai data masukan juga. Biasanya, model polusi dengan pendekatan Eulerian terbagi menjadi dua jenis, yakni tipe *offline*, yaitu model yang berdiri sendiri dan terpisah dari model atmosfernya, dan tipe *online*, yaitu model yang menjadi satu kesatuan dengan model cuacanya (Hu, 2015).

Baik tipe *offline* maupun tipe *online,* keduanya membutuhkan sumber daya komputasi yang besar. Hanya saja, untuk menentukan tipe model yang terbaik merupakan sesuatu yang sulit karena banyaknya faktor yang memengaruhi akurasi dari setiap model. Beberapa contoh model polusi dengan pendekatan Eulerian ialah model WRF-Chem, CAMx, CMAQ, dan model lainnya.

a. Model WRF-Chem

Model *Weather Research and Forecast-Chemistry* (WRF-Chem) merupakan salah satu pengembangan dari model WRF yang merupakan model numerik untuk memprediksi dan meneliti cuaca yang dikembangkan oleh beberapa lembaga riset di Amerika Serikat seperti NOAA, *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), dan lembaga riset lainnya. Model WRF-Chem ini merupakan pengembangan dari model WRF dengan penambahan modul perhitungan kimia atmosfer di dalam komponen modelnya. Dengan adanya komponen modul perhitungan kimia atmosfer, model ini mampu melakukan perhitungan penyebaran dan reaksi kimia dari polusi di udara. Model WRF-Chem telah digunakan secara luas oleh banyak lembaga riset dan akademisi di seluruh dunia (Fast et al., 2006; Grell et al., 2005; Powers et al., 2017).

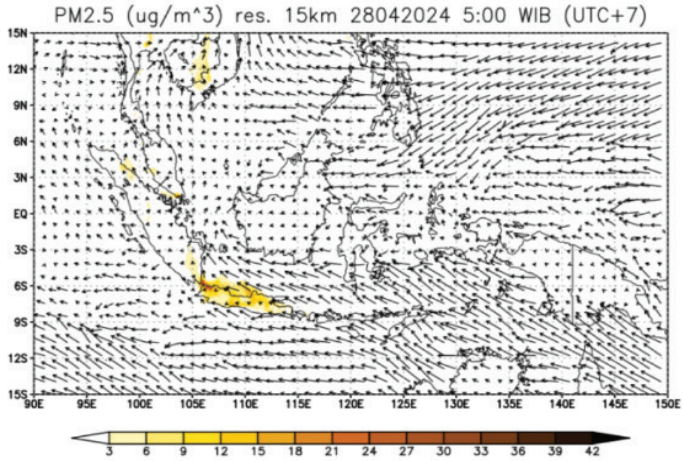
Pemanfaatan model WRF-Chem tidak hanya untuk menyimulasikan penyebaran polusi udara saja, tetapi juga untuk memprediksi kondisi polusi, menyimulasikan penyebaran kabut asap karena kebakaran hutan dan lahan, serta menghitung penyebaran konsentrasi gas sulfur dioksida (SO_2) akibat letusan gunung api. Selain itu, model WRF-Chem ini digunakan secara luas untuk kepentingan penelitian interaksi kimia atmosfer terhadap cuaca, iklim, dan juga kualitas udara. Pemanfaatan lainnya, model WRF-Chem telah digunakan secara operasional untuk memprediksi kondisi polusi udara ke depannya oleh beberapa lembaga di seluruh dunia (Powers et al., 2017).

Model WRF-Chem hingga saat ini masih terus dikembangkan dan dapat diunduh pada laman https://github.com/wrf-model/WRF/releases. Model WRF-Chem termasuk tipe model *online* karena secara struktur model ini menggabungkan komponen cuaca dan kimia atmosfer menjadi satu model. Oleh karena itu, sumber daya komputasi yang dibutuhkan oleh model ini akan lebih besar dibandingkan model WRF pada umumnya.

Saat ini, model WRF-Chem juga sudah digunakan oleh Pusat Riset Iklim dan Atmosfer (PRIA), Badan Riset dan Inovasi Nasional

(BRIN) untuk memprediksi kondisi polusi udara di Indonesia secara operasional.

Gambar 10.*2*. Untuk melihat hasil prediksi tersebut dapat mengunjungi laman https://srikandi-prototype.brin.go.id.



Sumber: Brin (2024)

Gambar 10.2 Contoh Hasil Prediksi $PM_{2.5}$ dari Luaran Model WRF-Chem

b. Model CAMx

Model *Comprehensive Air Quality Model with Extensions* (CAMx) menyimulasikan kualitas udara dalam skala geografis yang beragam. Model ini dapat menyimulasikan berbagai macam polutan termasuk partikulat, ozon, senyawa toksik, dan polutan lainnya. Model ini merupakan model numerik untuk melakukan perhitungan kimia atmosfer dan polusi udara yang dikembangkan oleh perusahaan konsultan multinasional asal Denmark bernama Ramboll. Model ini tidak berbayar dan dapat diunduh secara gratis pada laman www.camx.com.

Model CAMx merupakan model tipe *offline* karena model ini terpisah dari model cuaca pada saat pemasangan dan menjalankannya. Model ini tetap membutuhkan data masukan

kondisi cuaca dari model lain. Namun, data masukan model cuaca yang biasa digunakan berasal dari model WRF. Model ini telah dimanfaatkan secara luas oleh beberapa lembaga dan peneliti di seluruh dunia untuk kebutuhan penelitian ataupun layanan prediksi operasional.

c. Model CMAQ

Seperti halnya model WRF-Chem dan model CAMx, model *Community Multiscale Air Quality* (CMAQ) juga merupakan model numerik yang digunakan untuk menyimulasikan polusi atau kimia atmosfer. Model CMAQ ini dikembangkan oleh badan perlindungan lingkungan di Amerika Serikat (U.S. EPA) melalui proyek *Clean Air Act*. Walaupun begitu, model ini tidak berbayar dan dapat diunduh serta digunakan secara gratis. Untuk mengunduh model ini, laman berikut dapat diakses: https://github.com/USEPA/CMAQ/wiki/CMAQ-Release-Notes.

Seperti halnya model CAMx, model CMAQ merupakan tipe model *offline,* yaitu model yang dipasang dan dijalankan secara terpisah dari model cuaca. Meskipun demikian, tetap saja model ini membutuhkan data model cuaca sebagai data masukan. Data cuaca yang digunakan dapat berasal dari model WRF atau model cuaca lainnya (Li et al., 2022). Model ini pun telah secara luas digunakan untuk kepentingan penelitian ataupun sistem prediksi operasional terutama di wilayah Amerika Serikat. Versi terbaru dari model ini adalah versi 5.4 dan versi ini biasanya digabungkan dengan model WRF versi 4.4.

B. Model Polusi Udara Global

Selain model-model yang telah disebutkan pada subbab sebelumnya, ada juga model untuk menyimulasikan kimia atmosfer atau polusi udara dengan domain wilayah secara global. Biasanya, model polusi udara global menyimulasikan kondisi kimia atmosfer dan merupakan bagian dari model iklim. Walaupun begitu, pendekatan yang digunakan pada model polusi global secara umum masih menggunakan pendekatan Eulearian.

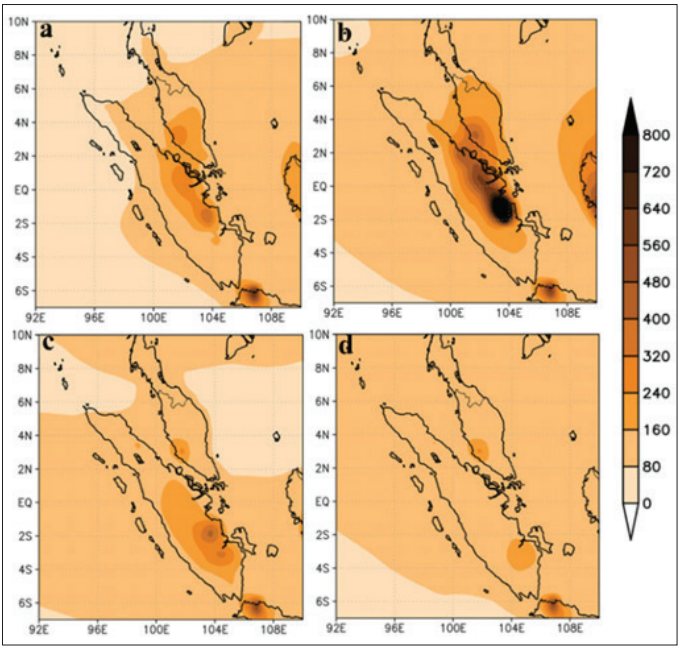
Saat ini, sudah banyak model iklim yang dikembangkan oleh berbagai negara seperti negara-negara Eropa dan Amerika Serikat. Untuk menyimulasikan iklim bumi, model iklim tidak hanya membutuhkan komponen atmosfer saja, tetapi juga membutuhkan komponen-komponen lain, seperti laut, permukaan daratan, dataran es, makhluk hidup, dan kimia atmosfer. Iklim di bumi sangatlah kompleks dan antarkomponen saling memberikan dampak dan berinteraksi satu sama lain.

Contoh dari model polusi udara global adalah model *Copernicus Atmosphere Monitoring Service* (CAMS) yang dikembangkan oleh badan prediksi cuaca Eropa (ECMWF). Model CAMS ini telah dijalankan secara operasional dan datanya dapat kita unduh secara gratis melalui tautan laman berikut: https://atmosphere.copernicus.eu. Tampilan dari laman *web* data model CAMS ditunjukkan pada Sumber: https://atmosphere.copernicus.eu

Sumber: CAMS (2025)

Gambar 10.3 Tampilan Website Sumber Data Model CAMS

Model CAMS menyediakan data prediksi polusi udara untuk beberapa polutan seperti $PM_{2.5}$, PM_{10}, karbon monoksida, ozon, dan polutan lainnya. Prediksi yang disediakan memiliki resolusi waktu per 3 jam dan spasial sekitar 40 km × 40 km. Selain menyediakan data prediksi global, model CAMS ini juga menyediakan data reanalisis dalam skala per 3 jam atau bulanan untuk waktu lampau. Data reanalisis merupakan data model yang telah dikoreksi dengan menggunakan data observasi atau data pembanding lainnya. Akan tetapi, resolusi spasial untuk data reanalisis ini jauh lebih kasar, yakni sekitar 75 km × 75 km (Inness et al., 2019). Salah satu pemanfaatan data model CAMS untuk kebutuhan penelitian ditunjukkan pada Keterangan: (a) Agustus, (b) September, (c) Oktober, (d) November



Keterangan: (a) Agustus, (b) September, (c) Oktober, (d) November

Sumber: Kombara et al. (2023)

Gambar 10.4 Penyebaran Karbon Monoksida (CO) dari Data Model CAMS saat Kebakaran Hutan dan Lahan Tahun 2019 di Sumatra

Data model CAMS ini dapat dimanfaatkan untuk kepentingan penelitian ataupun untuk penyediaan informasi prediksi polusi udara. Hanya saja, karena data ini dihasilkan dari model global, resolusi spasial yang disediakan tidak akan sebaik dari model-model regional yang telah disebutkan pada subbab sebelumnya. Meskipun begitu, untuk kebutuhan kajian secara multitahunan dan di wilayah yang cukup luas, data ini sudah cukup baik merepresentasikan kondisi yang ada.

Daftar Pustaka

Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). (2024). *SRIKANDI* [Prototipe sistem prediksi kualitas udara]. https://srikandi-prototype.brin.go.id

Cholianawati, N., Sinatra, T., Nugroho, G. A., Permadi, D. A., Indrawati, A., Halimurrahman, Kallista, M., Romadhon, M. S., Ma'ruf, I. F., Yudhatama, D., Madethen, T. A. P., & Awaludin, A. (2024). Diurnal and daily variations of PM2.5 and its multiple-wavelet coherence with meteorological variables in Indonesia. *Aerosol and Air Quality Research*, *24*(3), 1–18. https://doi.org/10.4209/aaqr.230158

Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). (2025). *CAMS*. https://atmosphere.copernicus.eu

Fast, J. D., Gustafson, W. I., Easter, R. C., Zaveri, R. A., Barnard, J. C., Chapman, E. G., Grell, G. A., & Peckham, S. E. (2006). Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of Houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *111*(21), 1–29. https://doi.org/10.1029/2005JD006721

Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., & Eder, B. (2005). Fully coupled "online" chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, *39*(37), 6957–6975. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.027

Hu, X. M. (2015). Boundary layer (atmospheric) and air pollution: Air pollution meteorology. In [nama editor belum lengkap — mohon dikonfirmasi] (Ed.), *Encyclopedia of atmospheric sciences* (2nd ed., pp. 227–236). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00499-0

Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barr, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A. M., Dominguez, J. J., Engelen, R., Eskes, H., Flemming, J., Huijnen, V., Jones, L., Kipling, Z., Massart, S., Parrington, M., Peuch, V. H., Razinger, M., Remy, S., Schulz, M., & Suttie, M. (2019). The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *19*(6), 3515–3556. https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019

Kombara, P. Y., Cahyono, W. E., Setyawati, W., Fitriana, H. L., Adetya, E., & Pratama, A. (2023). Air pollution impact during forest fire 2019 over Sumatra, Indonesia. *Springer Proceedings in Physics*, *290*, 129–139. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9768-6_13

Leel, Á., Mona, T., Mészáros, R., Lagzi, I., & Havasi, Á. (2016). *Mathematical problems in meteorological modelling*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40157-7

Li, J., Yu, S., Chen, X., Zhang, Y., Li, M., Li, Z., Song, Z., Liu, W., Li, P., Xie, M., & Xing, J. (2022). Evaluation of the WRF-CMAQ model performances on air quality in China with the impacts of the observation nudging on meteorology. *Aerosol and Air Quality Research*, *22*(4), 1–17. https://doi.org/10.4209/aaqr.220023

Powers, J. G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., Gill, D. O., Coen, J. L., Gochis, D. J., Ahmadov, R., Peckham, S. E., Grell, G. A., Michalakes, J., Trahan, S., Benjamin, S. G., Alexander, C. R., Dimego, G. J., Wang, W., Schwartz, C. S., Romine, G. S., … Duda, M. G. (2017). The Weather Research and Forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *98*(8), 1717–1737. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1

Bab XI

Peran dan Tantangan Sistem Informasi Kualitas Udara dalam Meningkatkan Kesehatan dan Kebijakan Lingkungan

Emmanuel Adetya

Sistem Informasi (SI) memainkan peran sentral dalam pemahaman dan penyelesaian masalah kompleks, terutama pada era revolusi industri 4.0 ketika setiap aspek kehidupan terkoneksi secara digital. Salah satu tantangan serius yang memerlukan perhatian khusus adalah kualitas udara.

Seiring dengan pertumbuhan perkotaan dan aktivitas manusia yang intens, pencemaran udara menjadi ancaman serius terhadap kesehatan dan keberlanjutan lingkungan. Kualitas udara yang

E. Adetya
Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: emma002@brin.go.id

© 2026 Editor & Penulis

Adetya, E. (2026). Peran dan Tantangan Sistem Informasi Kualitas Udara dalam Meningkatkan Kesehatan dan Kebijakan Lingkungan. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (227–246). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1815
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

buruk tidak hanya berdampak pada kesehatan manusia, tetapi juga berdampak signifikan pada ekosistem dan keberlanjutan planet kita. Partikulat, oksida nitrogen, dan senyawa organik volatil adalah beberapa kontaminan yang dapat membahayakan udara yang kita hirup setiap hari. Oleh karena itu, diperlukan upaya serius untuk memahami, memantau, dan mengelola kualitas udara dengan presisi.

Di Eropa, laporan dari *European Environment Agency* (2021) menunjukkan bahwa meskipun telah ada peningkatan kualitas udara secara umum, beberapa daerah masih mengalami konsentrasi polutan yang melebihi batas aman yang ditetapkan oleh WHO. Laporan ini menekankan pentingnya kebijakan yang lebih ketat dan teknologi monitoring yang lebih canggih untuk mengendalikan emisi dan melindungi kesehatan masyarakat (European Environment Agency, 2021; World Health Organization, 2020).

Pada masa pandemi Covid-19, terjadi perubahan signifikan dalam kualitas udara di banyak kota besar di dunia akibat penurunan aktivitas industri dan transportasi. Di Kazakhstan, misalnya, studi menunjukkan adanya penurunan tingkat polusi udara yang signifikan selama masa *lockdown* (Kerimray et al., 2020). Hal ini menunjukkan bahwa kebijakan pembatasan aktivitas dapat memiliki dampak langsung terhadap penurunan emisi polutan udara. Penerapan program ganjil-genap di beberapa kota besar di Indonesia juga menjadi contoh bagaimana kebijakan transportasi dapat berkontribusi pada pengurangan emisi gas berbahaya seperti CO_2, SO_2, dan NO_2 (Aisy, 2018).

Sistem Informasi Kualitas Udara menjadi jawaban atas kebutuhan akan pemantauan yang akurat dan responsif terhadap perubahan kondisi udara. Sistem Informasi Kualitas Udara terdiri atas jaringan sensor yang terhubung secara digital, platform komputasi tingkat tinggi, dan antarmuka pengguna yang memungkinkan akses mudah dan pemahaman yang lebih baik bagi pengguna akhir. Keberadaan Sistem Informasi Kualitas Udara memungkinkan pemerintah, lembaga penelitian, dan masyarakat umum untuk memahami dinamika kualitas udara secara mendalam.

A. Konsep Dasar Sistem Informasi Kualitas Udara

Sistem Informasi Kualitas Udara merupakan perpaduan antara teknologi informasi dan ilmu lingkungan. Konsep dasar Sistem Informasi Kualitas Udara melibatkan pemantauan, pengumpulan, analisis, dan penyajian data kualitas udara dengan menggunakan teknologi sensor yang terhubung dengan jaringan. Sistem Informasi Kualitas Udara memberikan informasi akurat tentang kualitas udara yang dapat diakses oleh publik, pemerintah, dan lembaga penelitian untuk mengambil keputusan yang tepat dalam menjaga kesehatan manusia dan lingkungan. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kesadaran, mengamati dampak kualitas udara terhadap kesehatan, dan membentuk dasar kebijakan lingkungan yang lebih baik.

B. Komponen Sistem Informasi Kualitas Udara

1. Sensor Kualitas Udara

Sistem Informasi Kualitas Udara memanfaatkan teknologi sensor yang dapat mengukur berbagai parameter kualitas udara seperti *particulate matter* (PM), ozon (O_3), nitrogen dioksida (NO_2), dan karbon dioksida (CO_2). Sensor-sensor ini ditempatkan secara strategis di berbagai lokasi untuk mendapatkan data yang representatif.

Sensor kualitas udara dirancang dengan sensitivitas tinggi untuk mendeteksi bahkan perubahan kecil dalam konsentrasi polutan udara. Ini penting karena beberapa polutan seperti $PM_{2.5}$, meskipun dalam konsentrasi rendah, dapat memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan manusia. Selain itu, teknologi sensor terus berkembang untuk meningkatkan akurasi, keandalan, dan ketahanan dalam berbagai kondisi cuaca dan lingkungan. Implementasi sensor ini juga mencakup kalibrasi dan pemeliharaan rutin untuk memastikan data yang dihasilkan tetap valid dan dapat diandalkan (Spinelle et al., 2017).

2. Jaringan Sensor

Data yang dihasilkan oleh sensor-sensor tersebut diintegrasikan melalui jaringan sensor yang terhubung. Jaringan ini memungkinkan

pengumpulan dan transfer data secara *real-time*, dapat diakses dari berbagai lokasi, dan memastikan respons cepat terhadap perubahan kondisi udara. Jaringan sensor ini sering menggunakan teknologi nirkabel seperti IoT (*Internet of Things*) untuk menghubungkan berbagai sensor yang tersebar luas, memungkinkan komunikasi data secara efisien dan tanpa kabel. Selain itu, jaringan ini biasanya dilengkapi dengan mekanisme redundansi untuk mengatasi potensi kegagalan pada salah satu sensor, memastikan bahwa data tetap tersedia, dan menjaga sistem terus berfungsi secara optimal. Dengan demikian, jaringan sensor berperan sebagai tulang punggung dalam Sistem Informasi Kualitas Udara sekaligus menjamin bahwa data yang dikumpulkan dapat diakses dan dianalisis secara terus-menerus.

3. Basis Data

Basis data menyimpan, mengelola, dan menganalisis data kualitas udara yang telah dikumpulkan. Basis data ini dapat digunakan untuk memahami tren jangka panjang, membuat prediksi terkait kualitas udara, dan memberikan dasar untuk keputusan yang bijak.

Basis data harus dirancang untuk menangani volume data yang besar dan beragam, termasuk data historis dan data *real-time* yang terus diperbarui. Selain itu, basis data ini harus dilengkapi dengan alat analisis canggih seperti *machine learning* dan algoritma prediktif yang dapat mengidentifikasi pola dan anomali dalam data. Keamanan data juga merupakan aspek penting yang memastikan bahwa data kualitas udara yang sensitif terlindungi dari akses tidak sah dan manipulasi. Dengan integrasi basis data yang solid, Sistem Informasi Kualitas Udara dapat menyediakan informasi yang komprehensif dan berharga untuk berbagai pemangku kepentingan.

4. Antarmuka Pengguna

Antarmuka pengguna memainkan peran signifikan dalam menyajikan data kualitas udara secara *real-time* agar mudah dapat dipahami oleh berbagai pihak. Desain yang intuitif memastikan bahwa informasi tersebut dapat dimengerti oleh berbagai lapisan

masyarakat. Antarmuka tersebut dapat berupa aplikasi *mobile*, situs *web*, atau *dashboard* khusus.

Desain antarmuka pengguna harus memperhatikan aksesibilitas dan kemudahan penggunaan, memungkinkan pengguna dengan berbagai latar belakang teknis dapat mengakses dan memahami informasi dengan mudah. Fitur-fitur tambahan seperti visualisasi data melalui grafik, peta interaktif, dan notifikasi peringatan kualitas udara juga dapat meningkatkan pengalaman pengguna. Selain itu, antarmuka ini harus mendukung berbagai bahasa dan perangkat serta memastikan bahwa informasi kualitas udara dapat diakses oleh masyarakat luas di berbagai lokasi. Dengan antarmuka pengguna yang efektif, Sistem Informasi Kualitas Udara dapat memberdayakan masyarakat untuk mengambil tindakan yang diperlukan dalam menghadapi kondisi udara yang buruk.

5. Pemanfaatan Data

Data yang dikumpulkan oleh Sistem Informasi Kualitas Udara tidak hanya bermanfaat untuk memahami kondisi saat ini, tetapi juga untuk berbagai tujuan lebih lanjut, misalnya untuk melakukan analisis epidemiologi atau untuk mempelajari dampak kualitas udara terhadap kesehatan manusia dalam jangka panjang. Selain itu, data tersebut juga dapat digunakan untuk mengembangkan model prediksi yang dapat memperingatkan masyarakat tentang potensi risiko kualitas udara yang buruk di masa depan. Lebih lanjut, pemanfaatan data dapat membantu dalam perencanaan tata ruang kota yang lebih baik, mengidentifikasi sumber polusi utama, dan mengevaluasi efektivitas kebijakan pengendalian polusi yang sudah diterapkan. Dengan demikian, data kualitas udara tidak hanya menjadi alat pemantauan, tetapi juga menjadi dasar bagi pengembangan strategi mitigasi dan adaptasi yang lebih baik terhadap polusi udara.

6. Sistem Pemantauan dan Peringatan Dini

Komponen tambahan dalam Sistem Informasi Kualitas Udara adalah sistem pemantauan dan peringatan dini. Sistem ini digunakan untuk mengidentifikasi perubahan signifikan dalam kualitas udara

yang dapat mengancam kesehatan masyarakat atau lingkungan. Ketika ambang batas tertentu terlampaui, sistem ini secara otomatis memicu peringatan kepada publik dan otoritas terkait melalui berbagai saluran komunikasi, termasuk pesan teks, media sosial, dan siaran darurat.

Keberadaan sistem pemantauan dan peringatan dini sangat penting dalam mitigasi dampak polusi udara secara cepat dan efisien. Selain itu, sistem ini juga dapat diintegrasikan dengan layanan kesehatan untuk memberikan informasi yang relevan kepada rumah sakit dan pusat kesehatan sehingga membantu mereka mempersiapkan diri menghadapi peningkatan kasus penyakit terkait polusi udara. Dengan adanya sistem pemantauan dan peringatan dini, respons terhadap kondisi udara yang memburuk dapat dilakukan dengan lebih cepat dan efektif serta mengurangi risiko kesehatan bagi masyarakat.

7. Integrasi dengan *Smart City*

Sistem Informasi Kualitas Udara makin terintegrasi dengan konsep *Smart City* atau Kota Pintar. Hal ini berarti data kualitas udara tidak hanya digunakan untuk keperluan lingkungan, tetapi juga digunakan untuk mengoptimalkan berbagai infrastruktur dan layanan kota, seperti transportasi publik dan manajemen lalu lintas. Dengan demikian, kualitas udara menjadi faktor penting dalam merancang kota yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Integrasi ini memungkinkan penggunaan data kualitas udara dalam pengaturan waktu lampu lalu lintas untuk mengurangi kemacetan dan emisi kendaraan, serta dalam penentuan lokasi hijau kota untuk memperbaiki kualitas udara lokal. Selain itu, integrasi ini juga mendukung inisiatif kota hijau yang lebih luas, seperti promosi penggunaan kendaraan listrik dan penerapan kebijakan ramah lingkungan di tingkat kota. Dengan demikian, integrasi dengan *Smart City* dapat memberikan manfaat ganda dalam meningkatkan kualitas hidup warga kota serta menjaga lingkungan.

8. Kolaborasi dan Partisipasi Masyarakat

Kesuksesan Sistem Informasi Kualitas Udara juga bergantung pada partisipasi aktif masyarakat dalam pemantauan dan pelaporan kualitas udara. Masyarakat dapat berkontribusi dengan melaporkan pengamatan mereka sendiri atau menggunakan aplikasi untuk berbagi data tentang kondisi udara di sekitar mereka.

Kolaborasi antara pemerintah, lembaga penelitian, dan masyarakat umum merupakan fondasi yang kuat untuk menjaga dan meningkatkan kualitas udara secara bersama-sama. Keterlibatan warga melalui inisiatif *citizen science*, yaitu kontribusi mereka dalam pengumpulan data kualitas udara, menjadi tren yang makin meningkat. Ini memungkinkan data menjadi lebih rinci dan terdistribusi, serta meningkatkan kesadaran publik terhadap isu-isu lingkungan (Zhang & Rao, 2018).

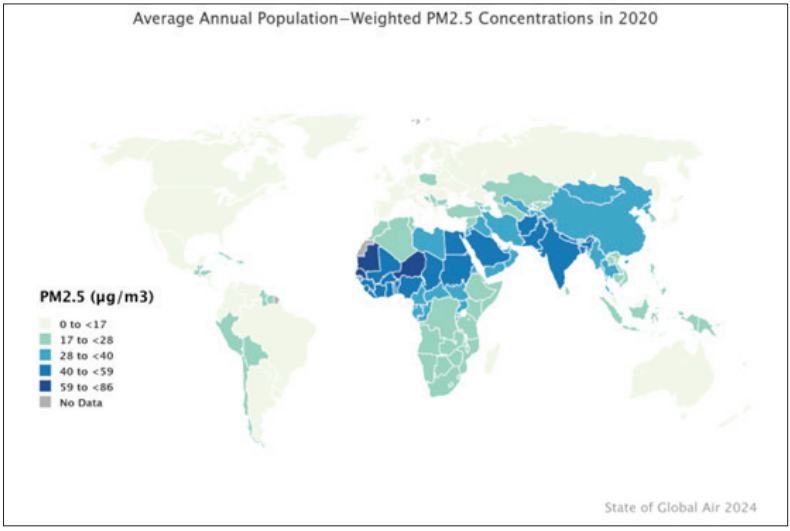
Partisipasi masyarakat dapat meningkatkan jangkauan pemantauan kualitas udara, terutama di area yang sulit dijangkau oleh sensor resmi. Selain itu, pendidikan dan penyuluhan kepada masyarakat mengenai pentingnya kualitas udara dan cara-cara untuk mengurangi polusi udara dapat membangun kesadaran kolektif dan mendorong tindakan proaktif dalam menjaga lingkungan. Dengan kolaborasi yang baik, Sistem Informasi Kualitas Udara dapat menjadi alat yang lebih efektif dalam melindungi kesehatan masyarakat dan lingkungan dari dampak negatif polusi udara.

C. Contoh Sistem Kualitas Udara Global

1. *Particulate Matter* 2.5 ($PM_{2.5}$)

Partikulate matter atau $PM_{2.5}$ adalah partikel udara dengan diameter kurang dari 2,5 μm, yang dapat masuk ke dalam sistem pernapasan manusia dan menyebabkan berbagai masalah kesehatan serius seperti penyakit jantung, penyakit paru-paru, dan kanker. $PM_{2.5}$ dihasilkan dari berbagai sumber seperti pembakaran bahan bakar fosil, kebakaran hutan, dan proses industri.

Menurut data dari *State of Global Air*, $PM_{2.5}$ adalah salah satu polutan udara yang paling berbahaya karena ukurannya yang kecil memungkinkannya masuk jauh ke dalam paru-paru dan bahkan ke aliran darah. Mengelola dan memantau $PM_{2.5}$ adalah prioritas utama dalam menjaga kualitas udara karena dampaknya yang signifikan terhadap kesehatan manusia. Pemantauan *real-time* $PM_{2.5}$ melalui Sistem Informasi Kualitas Udara memungkinkan deteksi dini dan tindakan preventif untuk melindungi kesehatan masyarakat.



Sumber: Health Effects Institute (2020)

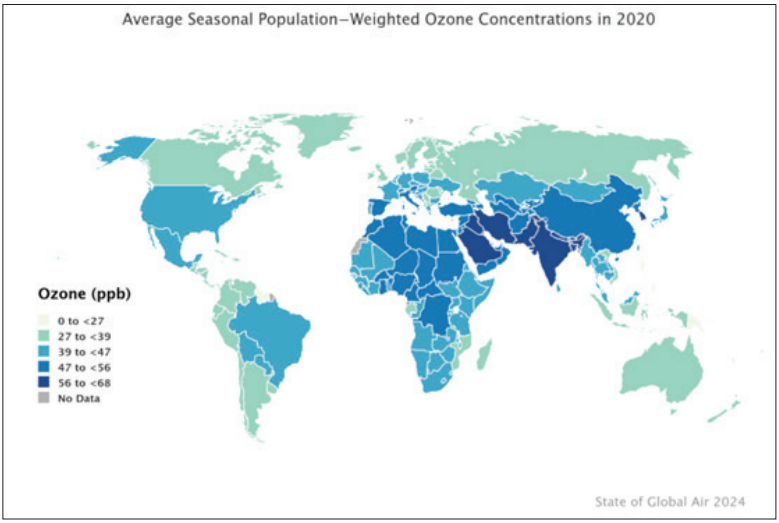
Gambar 11.1 Global Distribution of Population-Weighted Annual $PM_{2.5}$ Concentrations for 2020

2. Polusi Ozon (O_3)

Ozon di permukaan tanah atau polusi ozon terbentuk ketika polutan dari kendaraan bermotor, pembangkit listrik, dan sumber industri bereaksi dengan sinar matahari. Ozon adalah komponen utama *smog* dan dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan seperti iritasi saluran pernapasan, asma, dan penurunan fungsi paru-paru. Data

dari *State of Global Air* menunjukkan bahwa ozon permukaan tanah adalah masalah yang signifikan di banyak kota besar di seluruh dunia.

Pemantauan ozon melalui Sistem Informasi Kualitas Udara memungkinkan identifikasi area dengan konsentrasi ozon tinggi sehingga tindakan mitigasi dapat diambil, seperti pengaturan lalu lintas dan pengurangan emisi dari industri. Selain itu, informasi ini juga dapat digunakan untuk memberikan peringatan kepada masyarakat saat tingkat ozon mencapai tingkat yang tidak sehat.



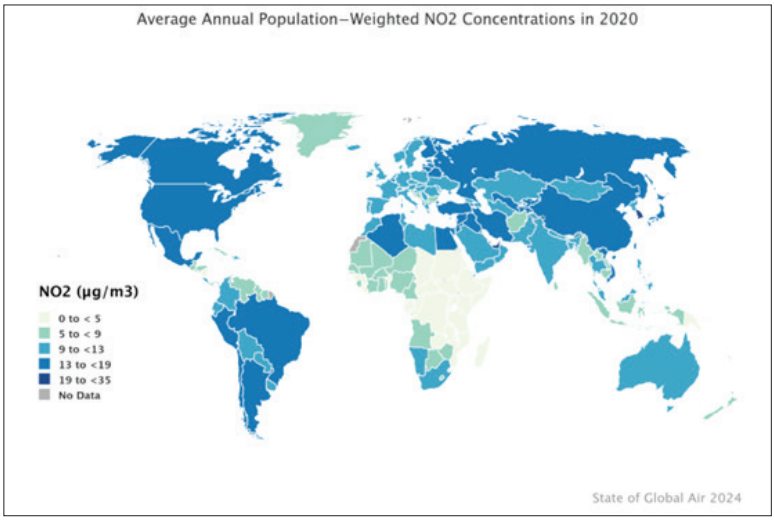
Sumber: Health Effects Institute (2020)

Gambar 11.2 Global Distribution of Population-Weighted Seasonal Ozone Concentrations for 2020

3. Nitrogen Dioksida (NO_2)

Nitrogen dioksida (NO_2) adalah gas beracun yang terutama dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil oleh kendaraan bermotor dan pembangkit listrik. NO_2 dapat menyebabkan iritasi saluran pernapasan, memperburuk asma, dan mengurangi daya tahan

terhadap infeksi pernapasan. Menurut *State of Global Air*, NO_2 adalah polutan udara utama di banyak kota besar, dan pemantauan serta pengendalian NO_2 sangat penting untuk melindungi kesehatan masyarakat. Sistem Informasi Kualitas Udara memungkinkan pemantauan NO_2 secara *real-time*, memberikan data yang diperlukan untuk mengidentifikasi sumber polusi, dan mengembangkan strategi pengurangan emisi yang efektif. Data ini juga penting untuk penegakan peraturan lingkungan dan peningkatan kesadaran masyarakat tentang dampak negatif NO_2.



Sumber: Health Effects Institute (2020)

Gambar 11.3 Global Distribution of Population-Weighted Annual Nitrogen Dioxide Concentrations for 2020

D. Manfaat Sistem Informasi Kualitas Udara

1. Pemantauan Kesehatan Masyarakat

Sistem Informasi Kualitas Udara memungkinkan pemantauan langsung terhadap dampak kualitas udara terhadap kesehatan masyarakat. Dengan adanya data *real-time* mengenai kadar polutan

seperti *particulate matter* (PM), ozon (O_3), nitrogen dioksida (NO_2), dan karbon dioksida (CO_2), instansi kesehatan dapat mengidentifikasi area yang memiliki tingkat polusi tinggi dan rentan terhadap penyakit pernapasan seperti asma, bronkitis, dan penyakit paru obstruktif kronik (PPOK) atau *Chronic Obstructive Pulmonary Disease* (COPD). Selain itu, informasi ini juga membantu dalam memonitor efek jangka panjang dari paparan polusi udara terhadap kesehatan kardiovaskular dan risiko kanker paru-paru.

Tindakan preventif dapat diambil lebih cepat dan tepat, misalnya melalui penyuluhan kesehatan, penyediaan masker bagi warga di area yang tercemar, atau pembatasan aktivitas luar ruangan pada hari-hari dengan kualitas udara buruk. Pemantauan kualitas udara juga penting dalam kasus kejadian luar biasa seperti kebakaran hutan atau ledakan industri, yang dampaknya terhadap kesehatan dapat sangat signifikan. Dengan adanya sistem ini, respons darurat dapat diatur dengan lebih baik, termasuk evakuasi dan penyediaan perawatan medis yang diperlukan.

2. Pengambilan Keputusan Pemerintah

Pemerintah dapat menggunakan data yang dikumpulkan oleh Sistem Informasi Kualitas Udara untuk merancang kebijakan lingkungan yang lebih efektif. Misalnya, data yang menunjukkan peningkatan kadar polutan di suatu wilayah dapat mendorong pemerintah untuk memberlakukan regulasi yang lebih ketat terhadap emisi industri di area tersebut. Selain itu, informasi ini juga dapat digunakan untuk mengelola lalu lintas secara lebih efisien, seperti penerapan sistem ganjil-genap atau pembatasan kendaraan bermotor di pusat kota pada hari-hari tertentu untuk mengurangi polusi udara.

Data kualitas udara juga dapat memandu pengembangan area hijau di kota, yang dapat berfungsi sebagai paru-paru kota dan membantu menurunkan kadar polutan di udara. Dalam jangka panjang, kebijakan berbasis data ini tidak hanya berkontribusi pada peningkatan kualitas udara, tetapi juga berkontribusi pada kesehatan dan kesejahteraan masyarakat secara keseluruhan. Kebijakan yang didasarkan pada data konkret cenderung lebih efektif dan diterima

oleh publik, karena masyarakat dapat melihat dasar ilmiah dan manfaat langsung dari kebijakan tersebut.

3. Edukasi Masyarakat

Sistem Informasi Kualitas Udara dapat digunakan sebagai alat edukasi untuk meningkatkan kesadaran masyarakat tentang pentingnya menjaga kualitas udara. Informasi yang mudah diakses melalui aplikasi *mobile*, situs *web*, atau papan informasi digital di tempat umum dapat membantu masyarakat memahami dampak aktivitas mereka terhadap lingkungan. Misalnya, dengan mengetahui bahwa penggunaan kendaraan bermotor secara berlebihan meningkatkan kadar polusi udara, masyarakat mungkin lebih terdorong untuk menggunakan transportasi umum atau bersepeda. Selain itu, informasi tentang hari-hari dengan kualitas udara buruk dapat mendorong masyarakat untuk mengambil tindakan preventif, seperti mengurangi aktivitas luar ruangan atau menggunakan masker.

Edukasi melalui sistem ini juga dapat mencakup penjelasan tentang bagaimana berbagai sumber polusi seperti industri, transportasi, dan pembakaran sampah berkontribusi terhadap kualitas udara yang buruk, serta langkah-langkah yang dapat diambil individu untuk mengurangi jejak polusi mereka. Dengan demikian, Sistem Informasi Kualitas Udara tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan, tetapi juga berfungsi sebagai sarana untuk membangun kesadaran dan mengubah perilaku menuju gaya hidup yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

E. Tantangan dan Perkembangan Masa Depan

1. Ketepatan dan Ketelitian Data

Tantangan utama dalam Sistem Informasi Kualitas Udara adalah memastikan ketepatan dan ketelitian data yang dikumpulkan. Sensor yang digunakan harus memiliki kemampuan untuk mengukur berbagai parameter kualitas udara dengan tingkat akurasi yang tinggi. Namun, sensor-sensor ini rentan terhadap faktor lingkungan seperti

suhu, kelembapan, dan polusi lingkungan lainnya yang dapat memengaruhi keakuratan pengukuran. Oleh karena itu, pemeliharaan sensor yang baik dan kalibrasi yang teratur sangat penting.

Kalibrasi harus dilakukan secara periodik untuk memastikan bahwa sensor memberikan data yang akurat dan konsisten. Selain itu, pengembangan teknologi sensor yang lebih tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem dan lebih mudah dalam hal pemeliharaan juga menjadi prioritas. Penyediaan pelatihan untuk personel yang bertanggung jawab atas pengoperasian dan pemeliharaan sensor dapat membantu dalam menjaga kualitas data yang dihasilkan.

2. Integrasi Data dari Berbagai Sumber

Integrasi data dari berbagai sumber juga merupakan tantangan signifikan. Data kualitas udara bisa berasal dari berbagai jenis sensor yang mungkin memiliki standar pengukuran dan protokol komunikasi yang berbeda. Selain itu, data juga dapat datang dari sumber lain seperti satelit, model prediksi cuaca, dan laporan lapangan. Mengintegrasikan semua data ini ke dalam satu sistem yang koheren dan dapat diakses memerlukan upaya besar dalam hal standar interoperabilitas dan kompatibilitas. Penggunaan format data yang seragam dan protokol komunikasi yang standar bisa membantu mengatasi tantangan ini. Namun, mencapainya membutuhkan koordinasi antara berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, lembaga penelitian, dan penyedia teknologi. Tantangan integrasi data juga mencakup pengolahan data dalam jumlah besar secara efisien dan memastikan bahwa data tersebut dapat diakses secara *real-time* oleh pengguna yang membutuhkannya.

3. Pengelolaan Data yang Besar

Sistem Informasi Kualitas Udara harus mampu menangani volume data yang besar dan beragam, termasuk data *real-time* dan data historis. Pengelolaan data dalam skala besar membutuhkan infrastruktur teknologi yang canggih, termasuk penyimpanan data yang besar, server yang kuat, dan perangkat lunak analitik yang mumpuni. Skalabilitas sistem menjadi faktor penting untuk memastikan bahwa

sistem dapat menangani peningkatan volume data seiring waktu. Selain itu, pengelolaan data juga mencakup kemampuan untuk membersihkan data dari kesalahan dan anomali, menggabungkan data dari berbagai sumber, serta menyajikan data tersebut dalam format yang mudah dipahami oleh pengguna akhir. Penggunaan teknologi *big data* dan *machine learning* dapat membantu mengatasi tantangan ini, tetapi juga memerlukan investasi signifikan dalam sumber daya dan keahlian.

4. Privasi dan Keamanan Data

Privasi dan keamanan data adalah masalah penting dalam Sistem Informasi Kualitas Udara. Data yang dikumpulkan dapat sangat sensitif, terutama jika terkait dengan lokasi spesifik yang dapat mengungkapkan informasi tentang kebiasaan dan aktivitas individu. Oleh karena itu, memastikan bahwa data tersebut dilindungi dari akses tidak sah dan penyalahgunaan menjadi prioritas.

Implementasi protokol keamanan data yang kuat, seperti enkripsi data, otentikasi pengguna, dan kontrol akses yang ketat, diperlukan untuk melindungi privasi data. Selain itu, kebijakan privasi yang transparan harus dikembangkan dan diimplementasikan untuk memastikan bahwa data digunakan secara etis dan sesuai dengan peraturan yang berlaku.

5. Interoperabilitas Antarplatform

Interoperabilitas antarplatform adalah tantangan lain yang harus diatasi. Sistem Informasi Kualitas Udara mungkin harus beroperasi dengan berbagai platform dan aplikasi lain yang digunakan oleh pemerintah, lembaga penelitian, dan masyarakat umum. Ini mencakup integrasi dengan sistem manajemen kota pintar, aplikasi kesehatan masyarakat, dan platform media sosial. Interoperabilitas sistem dan integrasi dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa data dapat diakses dan digunakan oleh berbagai pihak yang berkepentingan (Environmental Protection Agency, 2022; Li & Wang, 2020). Untuk memastikan interoperabilitas, penggunaan standar terbuka dan protokol komunikasi yang

umum diterima sangat penting. Namun, mencapai interoperabilitas penuh dapat menjadi proses yang kompleks dan memakan waktu, terutama ketika berbagai platform memiliki persyaratan dan arsitektur yang berbeda.

6. Peluang untuk Inovasi

Dengan adanya tantangan-tantangan tersebut, juga terbuka peluang besar untuk inovasi lebih lanjut dalam teknologi dan kebijakan lingkungan. Pengembangan sensor yang lebih canggih, algoritma analisis data yang lebih pintar, dan metode integrasi data yang lebih efisien adalah beberapa area yang berpotensi untuk inovasi. Selain itu, tantangan ini juga mendorong kolaborasi antarberbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, akademisi, industri, dan masyarakat, untuk bersama-sama mencari solusi yang efektif. Kebijakan lingkungan yang berbasis data dapat menjadi lebih responsif dan adaptif terhadap perubahan kondisi udara serta memberikan manfaat jangka panjang bagi kesehatan masyarakat dan kelestarian lingkungan.

F. Perkembangan Masa Depan dalam Sistem Informasi Kualitas Udara

1. Perkembangan Sensor yang Lebih Canggih

Masa depan Sistem Informasi Kualitas Udara diharapkan akan melihat perkembangan signifikan dalam teknologi sensor. Sensor generasi berikutnya akan lebih akurat, lebih sensitif, dan mampu mendeteksi berbagai jenis polutan dengan tingkat resolusi yang lebih tinggi.

Teknologi sensor baru juga diharapkan lebih tahan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem, sehingga dapat digunakan di berbagai lokasi dengan minim perawatan. Misalnya, sensor berbasis laser dan sensor berbasis teknologi optik menawarkan kemampuan deteksi yang lebih baik dan respons yang lebih cepat. Penggunaan material baru yang lebih tahan lama dan responsif terhadap polutan tertentu juga akan meningkatkan akurasi dan keandalan sensor.

Selain itu, miniaturisasi sensor memungkinkan pemasangan di lebih banyak lokasi dan bahkan pada perangkat portabel yang dapat dibawa oleh individu, memberikan data yang lebih granular dan *real-time*.

2. Penggunaan Teknologi Kecerdasan Buatan (AI) untuk Analisis Data

Penggunaan kecerdasan buatan (AI) untuk analisis data akan menjadi salah satu perkembangan utama dalam sistem informasi kualitas udara. AI dan *machine learning* (ML) dapat digunakan untuk mengolah data dalam jumlah besar dan kompleks dengan cepat, mengidentifikasi pola dan tren yang mungkin tidak terlihat melalui analisis konvensional. Algoritma AI dapat membantu dalam prediksi kualitas udara berdasarkan data historis dan kondisi cuaca saat ini, memberikan peringatan dini tentang episode polusi udara yang akan datang. Selain itu, AI dapat digunakan untuk mengoptimalkan penempatan sensor dengan menganalisis data geografis dan demografis untuk menentukan area yang paling membutuhkan pemantauan kualitas udara.

Integrasi AI dalam analisis data juga dapat memperbaiki deteksi anomali, memastikan bahwa data yang dikumpulkan lebih akurat dan andal. Teknologi AI juga memungkinkan pengembangan aplikasi mobile yang dapat memberikan rekomendasi personalisasi kepada pengguna berdasarkan kondisi udara di sekitar mereka.

3. Pemantauan Udara Menggunakan *Drone*

Penggunaan *drone* untuk pemantauan udara adalah perkembangan menarik lainnya yang dapat diharapkan di masa depan. *Drone* dilengkapi dengan sensor kualitas udara dapat digunakan untuk mengukur polutan di area yang sulit dijangkau atau berbahaya bagi manusia, seperti daerah industri berat atau lokasi kebakaran hutan.

Drone juga dapat melakukan pemantauan udara di berbagai ketinggian dan memberikan gambaran tiga dimensi tentang distribusi polutan di atmosfer. Selain itu, *drone* dapat digunakan untuk memantau perubahan kualitas udara secara dinamis, memberikan

data *real-time* yang dapat digunakan untuk tindakan cepat. Penggunaan *drone* untuk pemantauan udara juga memungkinkan pengumpulan data yang lebih terperinci dan spesifik, yang dapat digunakan untuk studi ilmiah dan pengembangan kebijakan lingkungan yang lebih baik.

4. Integrasi dengan *Internet of Things* (IoT)

Integrasi dengan *Internet of Things* (IoT) akan makin menghubungkan Sistem Informasi Kualitas Udara dengan berbagai perangkat dan sistem lainnya sehingga menciptakan ekosistem yang lebih responsif dan adaptif. IoT memungkinkan sensor kualitas udara untuk terhubung dengan perangkat lain seperti stasiun cuaca, kendaraan, dan infrastruktur kota pintar. Data yang dikumpulkan dapat diintegrasikan dengan sistem manajemen lalu lintas untuk mengurangi polusi kendaraan di daerah tertentu, atau dengan sistem bangunan pintar untuk mengatur ventilasi dan pengelolaan udara dalam ruangan. Integrasi ini juga memungkinkan pemantauan kualitas udara yang lebih komprehensif dan respons cepat terhadap perubahan kondisi udara. Misalnya, jika sensor mendeteksi peningkatan polusi udara di suatu area, sistem otomatis dapat menginformasikan warga melalui aplikasi mobile atau papan informasi digital, serta memberikan rekomendasi tindakan yang harus diambil. Selain itu, IoT memungkinkan pengembangan solusi berbasis komunitas, yang memungkinkan warga dapat berpartisipasi dalam pemantauan dan pelaporan kualitas udara di lingkungan mereka.

5. Kolaborasi Global dan Standar Internasional

Perkembangan di masa depan juga akan melihat peningkatan dalam kolaborasi global dan pengembangan standar internasional untuk pemantauan kualitas udara. Negara-negara dan organisasi internasional akan bekerja sama untuk menyusun protokol dan standar yang memastikan konsistensi dan kompatibilitas data kualitas udara di seluruh dunia. Hal ini memungkinkan pertukaran data yang lebih efektif dan analisis yang lebih komprehensif mengenai pola polusi udara global. Selain itu, standar internasional juga memfasilitasi

pengembangan teknologi yang dapat diterapkan di berbagai negara dan kondisi lingkungan. Kolaborasi ini juga memungkinkan pembelajaran dan adopsi praktik terbaik dari berbagai negara, meningkatkan efektivitas sistem informasi kualitas udara secara global.

G. Penutup

Sistem Informasi Kualitas Udara merupakan inovasi penting dalam upaya menjaga kesehatan manusia dan lingkungan. Dengan perkembangan teknologi seperti sensor yang lebih canggih, kecerdasan buatan (AI), dan *Internet of Things* (IoT), sistem ini memiliki potensi besar untuk memberikan dampak positif dalam mengatasi masalah kualitas udara global.

Penggunaan teknologi ini memungkinkan pemantauan kualitas udara secara *real-time*, yang esensial untuk memahami sumber dan tren polusi, serta memungkinkan tindakan cepat dalam mengurangi polusi di area tertentu. Pemerintah, masyarakat, dan perusahaan memiliki peran krusial dalam mendukung dan mengembangkan sistem ini. Pemerintah dapat menggunakan data dari sistem ini untuk merancang kebijakan lingkungan yang lebih efektif, sementara masyarakat dapat memanfaatkan informasi ini untuk meningkatkan kesadaran dan perilaku ramah lingkungan.

Perusahaan juga dapat mengintegrasikan data ini untuk mengurangi dampak operasional mereka terhadap kualitas udara. Meskipun ada tantangan dalam hal ketepatan dan ketelitian data, pemeliharaan sensor, serta integrasi data dari berbagai sumber, tantangan ini juga membuka peluang untuk inovasi lebih lanjut dalam teknologi dan kebijakan lingkungan. Sistem Informasi Kualitas Udara berpotensi menjadi pionir dalam menjaga udara kita tetap bersih dan sehat yang memberikan manfaat maksimal bagi kita semua.

Di masa depan, pengembangan teknologi yang lebih inovatif dalam pengelolaan polusi udara menjadi krusial. Seiring dengan perkembangan teknologi seperti kecerdasan buatan (AI) dan

big data, sistem informasi kualitas udara dapat dioptimalkan untuk memberikan prediksi yang lebih akurat dan respons yang lebih cepat terhadap perubahan kondisi udara (Wahyudi, 2023; Phillips, 2023). Namun, tantangan tetap ada, termasuk kebutuhan untuk meningkatkan interoperabilitas antara berbagai sistem dan teknologi yang digunakan untuk pemantauan kualitas udara di berbagai wilayah (Interoperability, n.d.; Sokhi et al., 2022). Dengan kemajuan teknologi dan kolaborasi global yang lebih baik, Sistem Informasi Kualitas Udara di masa depan akan menjadi lebih canggih, responsif, dan efektif dalam membantu kita memahami dan mengatasi tantangan polusi udara, menjaga kesehatan masyarakat, dan melindungi lingkungan.

Daftar Pustaka

Aisy, J. R. (2018). *Kajian penerapan program ganjil-genap untuk mengurangi beban emisi gas CO2, SO2, dan NO2 dari sektor transportasi di Kota Surabaya* [Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. https://repository.its.ac.id/53185/

Environmental Protection Agency. (2022). *Air quality monitoring and data management*. https://www.epa.gov/air-quality-management-process/air-quality-monitoring-and-data-management

European Environment Agency. (2021). *Air quality in Europe – 2021 report*. https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021-report

Health Effects Institute. (2020). *State of Global Air* [Platform data interaktif]. Diakses 19 Juni 2024, dari https://www.stateofglobalair.org/data/#/air/map

Interoperability. (n.d.). Amazon Web Services. https://aws.amazon.com/what-is/interoperability/

Kerimray, A., Baimatova, N., Ibragimova, O., Bukenov, B., Kenessov, B., Plotitsyn, P., & Karaca, F. (2020). Assessing air quality changes in large cities during Covid-19 lockdowns: The impacts of traffic-free urban conditions in Almaty, Kazakhstan. *Science of The Total Environment*, 730, Article 139179. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139179

Li, H., & Wang, Q. (2020). Application of IoT technology in air quality monitoring. *Journal of Environmental Sciences*, *87*, 94–106.

Phillips, J. (2023). *Innovative technologies for air pollution reduction: What's on the horizon?* Environmental Consortium. https://www.environmentalconsortium.org/innovative-technologies-for-air-pollution-reduction-whats-on-the-horizon/

Sokhi, R. S., Moussiopoulos, N., Baklanov, A., Bartzis, J., Coll, I., Finardi, S., Friedrich, R., Geels, C., Grönholm, T., Halenka, T., Ketzel, M., Maragkidou, A., Matthias, V., Moldanova, J., Ntziachristos, L., Schäfer, K., Suppan, P., Tsegas, G., Carmichael, G., … Kukkonen, J. (2022). Advances in air quality research – Current and emerging challenges. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *22*, 4615–4703. https://doi.org/10.5194/acp-22-4615-2022

Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M., Aleixandre, M., & Bonavitacola, F. (2017). Field calibration of a cluster of low-cost commercially available sensors for air quality monitoring. Part B: NO, CO and CO2. *Sensors and Actuators B: Chemical, 238*, 706–715. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.036

Wahyudi, T. (2023). Penerapan artificial intelligence (AI) dalam pengelolaan krisis bencana. *JICT-IKMI*, *23*(2), 433–439.

World Health Organization. (2020). *Air pollution*. https://www.who.int/health-topics/air-pollution

Zhang, L., & Rao, G. (2018). Air quality monitoring by citizens: When science and civil society meet. *Nature Reviews Earth & Environment*, *1*(7), 378–379.

Bab XII
Pengendalian Polusi Udara

Sumaryati

Sebagaimana telah dijelaskan pada Bab 1, oksigen merupakan kebutuhan vital bagi kehidupan manusia yang diperoleh melalui proses pernapasan. Begitu pentingnya oksigen bagi kelangsungan hidup, manusia tidak akan mampu bertahan tanpa bernapas lebih dari dua menit (Pleil et al., 2021). Namun, jika dalam udara yang dihirup mengandung polutan, polutan tersebut ikut terhirup dan dapat membahayakan kesehatan, meskipun pengambilan oksigen dalam proses pernapasan tersebut tidak terganggu. Polutan udara bukan hanya berdampak pada gangguan kesehatan, melainkan juga berdampak pada lingkungan. Oleh karena itu perlu dilakukan pengendalian polusi udara agar kualitas udara tetap terjaga untuk menjamin kesehatan dan kelestarian lingkungan.

Sumaryati
Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: sumary.bdg@gmail.com

© 2026 Editor & Penulis

Sumaryati. (2026). Pengendalian Polusi Udara. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (247–261). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1816
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

Sebagaimana tertuang dalam PP No. 22 tahun 2021, Pasal 188, pengendalian pencemaran udara meliputi tiga hal: pencegahan terjadinya pencemaran udara; penanggulangan apabila terjadi kasus pencemaran udara; dan pemulihan mutu udara sehingga udara kembali memenuhi standar kebutuhan kesehatan dan lingkungan. Sebagai catatan dalam peraturan perundangan di Indonesia menggunakan istilah *pencemaran* untuk polusi dan *pencemar* untuk polutan.

A. Dampak Polusi Udara

Berbagai fenomena polusi udara menunjukkan adanya kasus polusi udara berat dapat terjadi di daerah perkotaan maupun pedesaan, di ruang terbuka (*outdoor*) maupun dalam ruangan (*indoor*), yang disebabkan oleh sumber alami maupun antropogenik. Pemandangan kota yang tidak cerah karena adanya *smog* dan *smog* fotokimia yang muncul di kota besar seperti Bandung dan Jakarta.

Kabut asap (*smoke)* yang dihasilkan dari kebakaran hutan dan lahan, terutama lahan gambut di Kalimantan dan Sumatra, setiap musim kemarau panjang menimbulkan pencemaran lintas batas (*transboundary pollution)* sampai ke Malaysia dan Singapura. Menurunnya kesehatan masyarakat sebagai dampak polusi udara makin dirasakan masyarakat.

Sumber: The Jakarta Post (2023

Sumber: Channel New Asia (2023)

Gambar 12.1 Kabut asap di Malaysia dan Singapura Dampak dari Kebakaran di Indonesia Sumatra dan Kalimantan

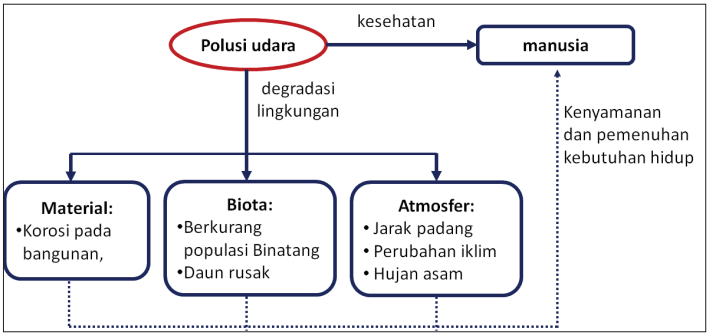
Dampak polusi udara yang bersifat langsung pada manusia adalah menurunnya kesehatan, baik dampak akut maupun kronis. Masyarakat umumnya dengan mudah memahami dampak akut, dampak yang langsung dirasakan ketika kita berada pada lingkungan udara kotor, seperti mata perih karena iritasi dan gangguan saluran pernapasan yang kita kenal dengan ISPA (infeksi saluran pernapasan akut). Dampak kronis terasa setelah waktu lama menghirup udara terpolusi, yang umumnya berupa penyakit berat seperti darah tinggi, gagal jantung, stroke, dan kanker yang dapat menyebabkan kematian, sehingga WHO pun menggelari polusi udara sebagai *sillent killer* (WHO, 2024).

Polusi udara juga berdampak pada kehidupan biota, baik hewan maupun tumbuhan. Polusi udara menjadi salah satu parameter penyebab kepunahan suatu spesies hewan (Kaiho, 2023). Tanaman mampu mengurangi polutan udara melalui proses fitoremediasi (Li et al., 2023). Namun di sisi lain, polusi udara dapat merusak tanaman. Salah satu contohnya, hujan asam sebagai dampak dari polusi udara menyebabkan kerusakan pada tanamn.

Kerusakan hutan di Cekoslowakia yang disebabkan oleh hujan asam pernah dilaporkan (USGS, 2006). Hujan asam terjadi karena polutan-polutan udara yang terlarut dalam air hujan. Selain merusak tanaman, hujan asam dapat menyebabkan kerusakan ekosistem air tawar dan menjadi penyebab korosi material.

Polusi udara bukan hanya berdampak pada kesehatan, melainkan juga berdampak pada perubahan iklim. World Health Organization (WHO, 2025) menjelaskan bahwa gas CO_2 dan CH_4 yang menyebabkan perubahan iklim, pada proses pembentukannya selalu disertai berbagai jenis polutan. Sifat kimia polutan udara ada yang bersifat korosif, seperti SO_2, debu, dan ion Cl^- dalam aerosol yang dapat merusak material di udara terbuka (X. Chen et al., 2022).

Berdasarkan uraian di atas, penulis menggambarkan dampak polusi udara dengan diagram berikut (Gambar 12.1).



Gambar 12.2 Dampak Polusi Udara secara Langsung dan Tidak Langsung pada Manusia

Kerusakan lingkungan biota maupun lingkungan fisik pada akhirnya mengurangi kenyamanan serta mengganggu pemenuhan kebutuhan kehidupan manusia. Dengan demikian, baik secara langsung maupun tidak langsung, baik dampak seketika maupun dampak terakumulasi, polusi udara berdampak negatif pada kehidupan manusia. Mengingat dampak polusi udara yang kompleks ini, perlu upaya nyata untuk menjaga agar kualitas udara tetap di bawah baku mutu udara ambien sebagaimana tercantum pada Lampiran 7 PP Nomor 22 Tahun 2021 untuk menjaga kesehatan dan lingkungan.

B. Mitigasi, Pengelolaan, dan Adaptasi Polusi Udara

Mengingat kejadian polusi udara dan dampaknya pada manusia, baik langsung maupun tidak langsung, perlu adanya upaya pengendalian polusi udara agar mutu kualitas udara tetap terjaga. Pengendalian polusi udara intinya adalah mitigasi dan pengelolaan kualitas udara agar dapat memenuhi standar kesehatan dan lingkungan.

Polusi udara terjadi karena adanya sumber emisi polutan yang besar dan didukung oleh kondisi meteorologi atau cuaca yang mendukung kondisi atmosfer stabil (Sumaryati et al., 2024; Xu et al.,

2019). Sumber polutan yang dapat dikendalikan hanyalah sumber antropogenik. Oleh karena itu, pengendalian polusi udara dalam PP Nomor 22 Tahun 2021 hanya mengendalikan sumber polutan antropogenik. Sumber alami atau sumber biogenik, aktivitasnya sulit atau bahkan tidak dapat dikendalikan, sehingga upaya yang dapat dilakukan terhadap sumber ini adalah adaptasi.

Pemilihan bahan baku dan bahan bakar yang ramah lingkungan serta teknologi proses yang tepat untuk dapat merekdusi terbentuknya polutan. Polutan udara sampai saat ini mayoritas bersumber dari pembakaran bahan bakar fosil. Oleh karena itu, eksplorasi energi terbarukan untuk mengganti bahan bakar fosil akan menjadi salah satu kunci keberhasilan pengendalian kualitas udara (Galimova et al., 2022).

Ketika penggunaan bahan bakar fosil belum dapat ditinggalkan dan proses industri masih menghasilkan polutan udara, perlu dilakukan pengelolaan atau konversi polutan tersebut menjadi senyawa lain yang lebih aman sebelum dibuang ke udara ambien. Sistem peralatan dapat diterapkan pada cerobong industri dan gas buang kendaraan bermotor untuk menahan terbuangnya polutan ke lingkungan atmosfer.

Electrostatic precipitator digunakan untuk mereduksi partikulat yang dibuang oleh cerobong industri. *Catalytic converter* digunakan untuk mengubah senyawa polutan yang berbahaya dari gas buang kendaraan bermotor menjadi senyawa yang lebih aman, baik untuk kesehatan manusia maupun lingkungan. *Catalytic converter* mengonversi polutan CO menjadi CO_2, NO_x menjadi N_2, dan hidrokarbon menjadi CO_2 dan uap air. *Scrubber* digunakan untuk mereduksi gas-gas polutan dari cerobong industri.

Perkembangan teknologi dan inovasi meningkatkan tingkat efisiensi dan perluasan penggunaan peralatan tersebut, sebagai contoh penggunaan *electrostatic precipitator* yang semula ditujukan untuk cerobong industri dikembangkan untuk dapat digunakan pada kendaraan bermotor berbahan bakar solar (Srinivaas et al., 2018), dan efisiensi electrostatic precipitator dikembangkan sampai 99,5% (Jon, 2020)..

Sektor transportasi sangat dominan menyumbang polutan udara. Hal ini dapat dilihat ketika terjadi *lockdown.* Aktivitas *outdoor,* terutama bertransportasi, berkurang karena pandemi Covid-19 yang otomatis menurunkan polutan udara secara signifikan. Selama *lockdown,* polutan primer meliputi NO_2, NO, CO, CO_2, $PM_{2.5}$, dan PM_{10} menurun secara signifikan, terutama NO_2 dan partikulat, sebagai dampak berkurangnya aktivitas transportasi, tetapi polutan sekunder ozon (O_3) tidak menunjukkan penurunan yang signifikan (Bakola et al., 2022; Dang & Trinh, 2022; Saha et al., 2022; Slezakova & Pereira, 2021). Oleh karena itu, pengelolaan sektor transportasi akan secara signifikan menurunkan polusi udara, terutama di daerah perkotaan.

Kebakaran hutan dan lahan, terutama lahan gambut, sebagaimana diuraikan pada Bab 1, dikategorikan sebagai polutan sumber alami. Hal itu didasarkan pada kasus kebakaran hutan yang dipicu oleh faktor alami. Meskipun demikian, pencegahan atau mitigasi sebenarnya dapat dilakukan terhadap kebakaran hutan. Ketika bencana tersebut sudah terjadi, pengelolaan juga dapat dilakukan agar kebakarannya tidak meluas dan dapat segera dipadamkan.

Hal ini berbeda dengan aktivitas gunung api, yang sama sekali tidak dapat dikendalikan. Studi literatur dapat dilakukan untuk mendapatkan metode pengelolaan kebakaran hutan yang tepat (Bargali et al., 2024). Karena kejadiannya dapat dikendalikan, kebakaran hutan dan lahan lebih tepat dikategorikan sebagai sumber antropogenik.

Sumber polutan alami, seperti aktivitas gunung api dan laut, tidak dapat dikendalikan maupun dikelola emisinya. Tindakan terhadap sumber polutan alami yang dapat dilakukan adalah beradaptasi.

Secara alami, terdapat tanaman yang tahan terhadap paparan senyawa sulfur dan dapat tumbuh di sekitar gunung api yang aktif melepaskan gas SO_2 dan H_2S. Penggunaan material tahan korosi disarankan untuk daerah pantai atau dekat aktivitas gunung api guna mengantisipasi dampak polutan korosif. Pada prinsipnya,

adaptasi didasarkan pada karakter aktivitas gunung api. Misalnya, jika gunung api tersebut banyak menghasilkan gas SO_2, material yang mudah korosif sebaiknya dihindari untuk bangunan di sekitarnya.

Konsentrasi polutan di udara ambien bukan hanya ditentukan oleh besarnya sumber emisi, melainkan juga oleh kondisi meteorologi. Ditinjau per parameter meteorologi, hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi polutan berkorelasi positif dengan tekanan dan berkorelasi negatif dengan temperatur, kelembapan, curah hujan, dan kecepatan angin (X. Li et al., 2017).

Arah angin menentukan arah perjalanan polutan. Curah hujan berperan penting dalam membersihkan partikulat melalui proses *washout*, terutama untuk partikel berukuran besar (*coarse particle*) (Guo et al., 2016; McMullen et al., 2021).

Kondisi meteorologi lain yang penting dalam percampuran polutan adalah stabilitas atmosfer. Stabilitas atmosfer dapat diketahui dari profil vertikal temperatur. Pada prinsipnya, jika lapisan atmosfer bawah lebih dingin dari lapisan di atasnya, kondisi atmosfer stabil dan sebaliknya. Makin stabil kondisi atmosfer, makin rendah ruang percampuran polutan sehingga konsentrasinya makin tinggi, dan sebaliknya jika kondisi atmosfer tidak stabil (Sumaryati et al., 2024; Tursumbayeva et al., 2022; Yavuz, 2023). Oleh karena itu, pengendalian emisi polutan udara dari sumber antropogenik perlu mempertimbangkan kondisi meteorologi agar kualitas udara ambien tetap baik, yakni tidak melebihi baku mutu udara ambien.

Pengetahuan yang komprehensif terkait polusi udara serta meteorologi polusi udara menjadi landasan yang kuat untuk pengelolaan kualitas udara. Kajian teoritik maupun empiris dilakukan untuk menduga karakteristik polutan, serta parameter meteorologi yang berperan penting pada penyebaran polutan dan proses pembersihan polutan dari atmosfer.

Monitoring polutan yang lengkap secara spasial maupun temporal yang diperoleh dengan pengukuran secara *in situ* maupun *remote* menjadi bukti kondisi kualitas udara yang tidak terbantahkan. Berdasarkan data monitoring tersebut, dapat diperoleh sifat polutan

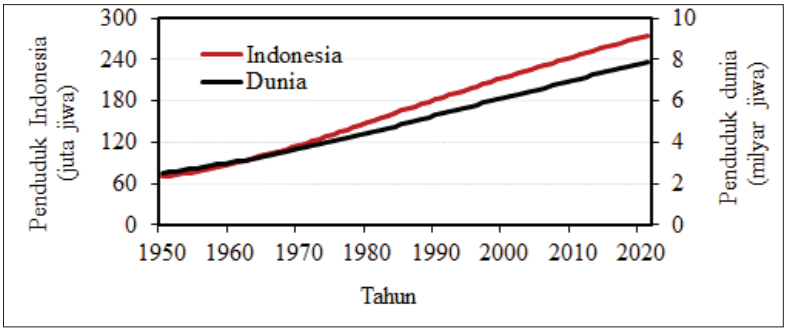
secara empiris, sekaligus dapatt digunakan untuk membuktikan kajian teoritis dan hasil pemodelan polusi udara.

Pengelolaan polusi udara melibatkan banyak pihak yang terkait, baik secara individu maupun korporasi, pemerintah maupun swasta, produsen maupun konsumen, serta pihak *emiter* maupun yang terpapar, masing-masing pihak memiliki perannya sendiri. Agar setiap pihak mempunyai hak dan tanggung jawab yang melekat, diperlukan regulasi yang mengikat.

Regulasi terkait polusi udara tidak bersifat global, yakni tidak berlaku di seluruh dunia. Tiap-tiap negara memiliki aturan sendiri, tetapi dapat saling mengacu. Hal ini karena kasus polutan udara umumnya bersifat reaktif dan berumur pendek sehingga tidak terdispersi jauh dan tidak tersebar merata di seluruh atmosfer bumi. Hal ini berbeda dengan gas rumah kaca dan bahan perusak ozon yang regulasinya bersifat global (Sumaryati, 2020).

C. Tantangan dan Peluang Pengelolaan Polusi Udara

Pertumbuhan penduduk dunia termasuk Indonesia meningkat secara linear, dengan laju pertambahan sekitar 80 juta per tahun untuk seluruh penduduk dunia, dan 3 juta per tahun untuk penduduk Indonesia. Salah satu permasalahan akibat pertambahan penduduk adalah peningkatan emisi polutan udara. Penelitian di Jerman menunjukkan bahwa makin padat populasi penduduk, makin tinggi konsentrasi polutan (Borck & Schrauth, 2021). Dengan demikian, meningkatnya jumlah penduduk berkonsekuensi pada kenaikan emisi polutan, meskipun kenaikannya tidak selalu berbanding lurus dengan pertumbuhan penduduk.



Sumber: Our World in Data (2024)

Gambar 12.3 Penduduk Indonesia dan Dunia

Selain jumlah penduduk, kemajuan teknologi turut mengubah peradaban manusia dari aktivitas yang bersifat alami menjadi berbasis teknologi. Tenaga otot diganti dengan tenaga berbasis mesin yang menggunakan bahan bakar untuk menggerakkannya. Konsekuensinya, pembakaran bahan bakar tersebut menghasilkan polutan. Kemajuan proses industri juga tidak dapat dipungkiri sering menimbulkan polutan baru.

Ketika kasus polusi udara muncul dengan dampak yang serius, hal itu memicu berbagai upaya untuk memperbaiki kualitas udara pada kondisi semula yang sehat. Kemajuan ilmu mampu mengungkap kasus polusi udara beserta dampaknya dan metode pengelolaannya.

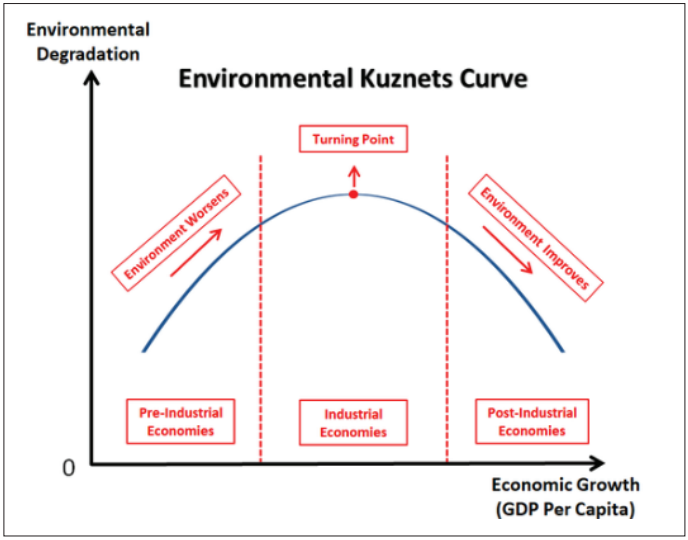
Pengembangan teknologi sensor dan *monitoring* dapat memberikan informasi kondisi kualitas udara secara *real time*. Alat *monitoring* polutan yang jangkauan ruangannya terbatas dapat dibantu dengan pengamatan satelit dan pemodelan yang mampu menggambarkan kondisi polutan secara spasial dan temporal secara lebih lengkap. *Artificial intelligence* (AI) dan *machine learning* mampu menganalisis dan menginterpretasikan data dalam kuantitas besar dan kompleks dengan cepat. Pemodelan selain dapat memberikan gambaran kondisi polusi udara secara spasial dan temporal dengan

resolusi yang rapat, juga dapat memberikan prediksi kondisi polusi udara di masa depan dengan berbagai skenario.

Perkembangan teknologi informasi mempermudah pemahaman polusi udara bagi masyarakat. *Monitoring*, baik dengan peralatan *in situ* maupun dengan satelit dapat ditampilkan mendekati *real time*. Berbagai aplikasi polusi udara menyajikan hasil *monitoring*, pemodelan, serta fenomena-fenomena polusi udara dengan menarik dan mudah difahami. Aplikasi IoT mengintegrasikan hasil monitoring polusi udara beserta analisa dan interpretasinya dengan infrastruktur pengendali kualitas udara. Dengan demikian, jika ada kejadian polusi udara akan cepat teratasi.

Selain kemajuan teknologi, peningkatan pendapatan juga memengaruhi gaya hidup. Terdapat potensi bahwa makin tinggi pendapatan, makin tinggi pula konsumsi energi, dengan konsekuensi peningkatan emisi polutan (Nathaniel & Adedoyin, 2021). Peningkatan pendapatan mendorong peningkatan konsumsi, baik barang maupun jasa, yang dalam proses produksinya melibatkan penggunaan energi yang bersumber dari pembakaran bahan bakar. Pendapatan yang terus meningkat juga mengurangi minat masyarakat terhadap transportasi massal. Makin kaya seseorang, kendaraan pribadi menjadi solusi transportasi, bukan lagi transportasi umum; kendaraan roda dua pun digantikan kendaraan roda empat yang lebih banyak membakar bahan bakar.

Namun, dengan pemahaman masyarakat tentang polusi udara yang makin meningkat dan informasi polusi udara yang menyebar secara masif, masyarakat akhirnya menyadari kebutuhan akan udara bersih. Hanya saja, menciptakan udara bersih membutuhkan teknologi bersih, yang berdampak pada pembiayaan relatif tinggi. Jika pendapatan sudah tinggi, hal ini tidak menjadi halangan. Masyarakat dengan pendapatan tinggi akan rela membayar untuk mengupayakan kondisi udara bersih sehingga dalam kondisi ini, makin tinggi pendapatan masyarakat, makin mampu pula mereka mereduksi polusi udara.



Sumber: Economics Online (2025)

Gambar 12.4 *Environmental Kuznets Curve*

Polusi udara berdampak pada degradasi lingkungan, khususnya kualitas udara. Jika digambarkan, korelasi antara pendapatan masyarakat dan degradasi lingkungan pada awalnya berbanding lurus: makin tinggi pendapatan, makin tinggi pula degradasi lingkungan yang dihasilkan. Akan tetapi, pada titik tertentu, terjadi titik balik: makin tinggi pendapatan masyarakat, degradasi lingkungan justru mampu ditekan. Hubungan antara pendapatan masyarakat dan degradasi lingkungan ini—yang salah satu penyebabnya adalah polusi udara—disebut sebagai hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC) (Nikensari et al., 2019).

Berdasarkan hipotesis tersebut, untuk negara berkembang, makin tinggi pendapatan, makin tinggi pula polusi udara, sebagaimana hasil penelitian yang dilakukan Nathaniel dan Adedoyin di negara Turki, Mexico, Nigeria dan Indonesia yang menyimpulkan bahwa makin tinggi GDP, ada kecenderungan makin tinggi pula polutan (Nathaniel & Adedoyin, 2021). Namun sebaliknya, di Ontario, Kanada, hasil penelitian menunjukkan bahwa

kasus polusi udara tinggi justru cenderung berada pada daerah yang masyarakatnya memiliki GDP rendah (Finkelstein et al., 2003).

Berdasarkan uraian di atas, bukan hanya pertumbuhan ekonomi yang mengikuti hipotesis *Environmental Kuznets Curve*, melainkan juga kemajuan ilmu dan teknologi. Pada tahap awal kemajuan pengetahuan masyarakat, makin maju pengetahuan masyarakat, makin meningkat pula emisi polutan yang dihasilkan. Hal itu telah terjadi pada awal revolusi industri yang banyak memunculkan kasus polusi udara. Tahap selanjutnya terjadi titik balik, dengan dikembangkan teknologi ramah lingkungan, sehingga makin tinggi pengetahuan mampu menciptakan teknologi ramah lingkungan. Pengetahuan yang tinggi di masyarakat dapat mempercepat *turning point* dalam *Environmental Kuznets Curve*.

Kesadaran masyarakat tentang pentingnya mengetahui polusi udara saja belum cukup dalam pengelolaan polusi udara. Regulasi yang mengikat semua pihak harus dibuat untuk melindungi sekaligus menjamin pemenuhan hak dan kewajiban setiap pemangku kepentingan terkait, demi menciptakan kualitas udara yang sehat. Regulasi yang diterapkan secara ketat mampu mereduksi polusi secara signifikan (Z. B. Chen et al., 2024). Regulasi pun dapat mempercepat terjadinya *turning point*, selain kesadaran masyarakat dan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Daftar Pustaka

Bakola, M., Hernandez Carballo, I., Jelastopulu, E., & Stuckler, D. (2022). The impact of Covid-19 lockdown on air pollution in Europe and North America: A systematic review. *European Journal of Public Health*, *32*(6), 962–968. https://doi.org/10.1093/eurpub/ckac118

Bargali, H., Pandey, A., Bhatt, D., Sundriyal, R. C., & Uniyal, V. P. (2024). Forest fire management, funding dynamics, and research in the burning frontier: A comprehensive review. *Trees, Forests and People*, *16*, Article 100526. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100526

Borck, R., & Schrauth, P. (2021). Population density and urban air quality. *Regional Science and Urban Economics*, *86*, Article 103596. https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2020.103596

Chen, X., Zhang, Z., Zhang, H., Yan, H., Liu, F., & Tu, S. (2022). Influence of air pollution factors on corrosion of metal equipment in transmission and transformation power stations. *Atmosphere*, *13*(7), Article 1041. https://doi.org/10.3390/atmos13071041

Chen, Z. B., He, G., & Jiang, S. Z. (2024). The impact of environmental regulation and industrial agglomeration on air pollution: On the spatial spillover perspective. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *21*(3), 2585–2604. https://doi.org/10.1007/s13762-023-05143-w

Dang, H.-A. H., & Trinh, T.-A. (2022). The beneficial impacts of Covid-19 lockdowns on air pollution: Evidence from Vietnam. *The Journal of Development Studies*, *58*(10), 1917–1933. https://doi.org/10.1080/00220388.2022.2069492

Economics Online. (n.d.). *The Kuznets curve*. Diakses 10 Desember 2025, dari https://www.economicsonline.co.uk/definitions/the-kuznets-curve.html/

Finkelstein, M. M., Jerrett, M., DeLuca, P., Finkelstein, N., Verma, D. K., Chapman, K., & Sears, M. R. (2003). Relation between income, air pollution and mortality: A cohort study. *CMAJ: Canadian Medical Association Journal*, *169*(5), 397–402.

Galimova, T., Ram, M., & Breyer, C. (2022). Mitigation of air pollution and corresponding impacts during a global energy transition towards 100% renewable energy system by 2050. *Energy Reports*, *8*, 14124–14143. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.343

Guo, L.-C., Zhang, Y., Lin, H., Zeng, W., Liu, T., Xiao, J., Rutherford, S., You, J., & Ma, W. (2016). The washout effects of rainfall on atmospheric particulate pollution in two Chinese cities. *Environmental Pollution*, *215*, 195–202. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.003

Jon, W. (2020). Analisis kinerja electrostatic precipitator (ESP) berdasarkan pembagian besarnya arus transformator di PT PJB UBJOM PLTU Paiton. *Jurnal EECCIS (Electrics, Electronics, Communications, Controls, Informatics, Systems)*, *14*(2), 45–57. https://doi.org/10.21776/jeeccis.v14i2.637

Kaiho, K. (2023). An animal crisis caused by pollution, deforestation, and warming in the late 21st century and exacerbation by nuclear war. *Heliyon*, *9*(4), Article e15221. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15221

Li, X., Feng, Y. J., & Liang, H. Y. (2017). The impact of meteorological factors on PM2.5 variations in Hong Kong. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *78*, Article 012003. https://doi.org/10.1088/1755-1315/78/1/012003

Li, Y., Chen, X., Sonne, C., Lam, S. S., Yang, Y., Ma, N. L., & Peng, W. (2023). Reduction and control of air pollution: Based on plant-microbe interactions. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, *35*(1), Article 2173657. https://doi.org/10.1080/26395940.2023.2173657

McMullen, N., Annesi-Maesano, I., & Renard, J.-B. (2021). Impact of rain precipitation on urban atmospheric particle matter measured at three locations in France between 2013 and 2019. *Atmosphere*, *12*(6), Article 769. https://doi.org/10.3390/atmos12060769

Nathaniel, S. P., & Adedoyin, F. F. (2021). The role of income, trade, and environmental regulations in ensuring environmental sustainability in MINT countries: Evidence from ecological footprint. *Studies of Applied Economics*, *39*(8). https://doi.org/10.25115/eea.v39i8.4173

Nikensari, S. I., Destilawati, S., & Nurjanah, S. (2019). Studi Environmental Kuznets Curve di Asia: Sebelum dan setelah Millennium Development Goals. *Jurnal Ekonomi Pembangunan*, *27*(2), 11–25. https://doi.org/10.14203/JEP.27.2.2019.11-25

Our World in Data. (n.d.). *Population growth*. Diakses 10 Desember 2024, dari https://ourworldindata.org/population-growth

Saha, L., Kumar, A., Kumar, S., Korstad, J., Srivastava, S., & Bauddh, K. (2022). The impact of the Covid-19 lockdown on global air quality: A review. *Environmental Sustainability*, *5*(1), 5–23. https://doi.org/10.1007/s42398-021-00213-6

Slezakova, K., & Pereira, M. C. (2021). 2020 Covid-19 lockdown and the impacts on air quality with emphasis on urban, suburban and rural zones. *Scientific Reports*, *11*(1), Article 21336. https://doi.org/10.1038/s41598-021-99491-7

Srinivaas, A., Sathian, S., & Ramesh, A. (2018). Design and optimisation of electrostatic precipitator for diesel exhaust. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *310*, Article 012137. https://doi.org/10.1088/1757-899X/310/1/012137

Sumaryati. (2020). *Tujuh lapisan atmosfer dalam menopang habitabilitas Bumi* (1st ed., Vol. 1). Rosda.

Sumaryati, Saipul, H., Atep, R., Syafridjon, Risyanto, Lambang, N., Angga, Y. P., & Estiningtyas, K. (2024). The impact of atmospheric stability affected by peat forest fire on surface PM2.5 concentration in Pontianak urban area during La Niña events 2022. *International Journal of Environmental Science and Development*, *15*(3). https://doi.org/10.18178/ijesd.2024.15.3.1475

Tursumbayeva, M., Kerimray, A., Karaca, F., & Permadi, D. A. (2022). Planetary boundary layer and its relationship with PM2.5 concentrations in Almaty, Kazakhstan. *Aerosol and Air Quality Research*, *22*(8), Article 210294. https://doi.org/10.4209/aaqr.210294

United States Geological Survey. (2006). *Forest affected by acid rain* [Photograph]. Diakses Maret 2025, dari https://www.usgs.gov/media/images/forest-affected-acid-rain

World Health Organization. (2025). *Climate impacts of air pollution*. Diakses Maret 2025, dari https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-energy-and-health/health-impacts/climate-impacts-of-air-pollution

Xu, Y., Zhu, B., Shi, S., & Huang, Y. (2019). Two inversion layers and their impacts on PM2.5 concentration over the Yangtze River Delta, China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *58*(11), 2349–2362. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0008.1

Yavuz, V. (2023). An analysis of atmospheric stability indices and parameters under air pollution conditions. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(8), Article 934. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11556-4

Glosarium

AERMOD	:	*Gaussien plume* model yang menggunakan kondisi *steady-state* untuk menyimulasikan pergerakan emisi di udara.
Aerosol	:	Campuran partikel padat atau cairan kecil yang tersuspensi di udara.
Agen	:	Penyebab, virus penyebab suatu jenis penyakit.
AioT	:	Integrasi teknologi AI dan IoT
Aksesibilitas	:	Tingkat kemudahan yang disediakan untuk semua individu, termasuk mereka dengan kebutuhan khusus, dalam mengakses informasi, teknologi, atau lingkungan fisik.
Albedo	:	Bagian yang dipantulkan dari gelombang cahaya Analisis
epidemiologi	:	Studi tentang distribusi dan determinan penyakit dalam populasi, digunakan untuk mengontrol masalah kesehatan masyarakat.
Analisis tren	:	Proses pengamatan pola dalam data dari waktu ke waktu untuk memprediksi perkembangan masa depan atau memahami perubahan historis.

Antarmuka
Pengguna : Bagian dari sistem yang memungkinkan pengguna untuk berinteraksi dengan perangkat lunak atau perangkat keras, mencakup elemen visual dan kontrol interaktif.

Antropogenik : Segala kegiatan yang dilakukan oleh manusia.

Aplikasi *mobile* : Perangkat lunak yang dirancang untuk dijalankan pada perangkat seluler, seperti *smartphone* atau tablet, menawarkan berbagai fungsi dari hiburan hingga produktivitas.

Artificial intellegence (AI): Kecerdasan buatan, yaitu bidang ilmu komputer yang berfokus pada pembuatan sistem yang dapat melakukan tugas yang biasanya membutuhkan kecerdasan manusia, seperti pengenalan suara, pengambilan keputusan, dan pembelajaran.

Asam anorganik: Jenis asam yang berasal dari senyawa anorganik, yaitu senyawa yang tidak mengandung ikatan karbon-hidrogen (C-H) sebagai ciri utama. Asam anorganik sering kali bersifat korosif dan memiliki peran penting dalam berbagai proses industri, laboratorium, dan kehidupan sehari-hari.

Asam nitrat (HNO_3) : Dalam polusi udara, senyawa ini terbentuk terutama melalui reaksi kimia di atmosfer yang melibatkan nitrogen dioksida (NO_2), salah satu polutan utama yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil.

Asam sulfat (H_2SO_4) : Dalam konteks polusi udara, senyawa ini terbentuk dari emisi sulfur dioksida (SO_2) yang berasal dari berbagai sumber industri dan transportasi.

Aterosklerosis : Penebalan dan pengerasan dinding arteri.

Bahan bakar

fosil : Sumber energi seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam yang terbentuk dari sisa-sisa makhluk hidup purba.

Baku mutu kualitas udara : Standar yang ditetapkan untuk melindungi kesehatan manusia dari polutan udara dalam ruang.

Basis data : Kumpulan informasi atau data yang disimpan secara sistematis dalam komputer sehingga dapat diakses, diperbarui, dan dikelola secara efisien.

Benzo(a)pyrene (BaP) : Salah satu jenis polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) yang terdiri atas lima cincin benzena yang menyatu, dikenal luas karena sifat karsinogeniknya.

Bioaerosol : Mikroorganisme yang tersebar di udara atau menempel pada partikulat dalam ruangan.

Biomassa : Material organik yang berasal dari makhluk hidup, seperti tanaman, kayu, dan limbah hewan, yang bisa digunakan sebagai sumber energi.

Black carbon : Istilah dari jenis materi yang mengandung unsur karbon yang bersifat mencemari lingkungan atau sebagai polutan (pencemar).

CALPUFF : *Gaussien plume model* yang menggunakan kondisi *non-steady-state*, mampu menyimulasikan perpindahan substansi pada kondisi *calm* atau stagnan, topografi yang kompleks, dan area pantai.

CAMS : Singkatan dari *Copernicus Atmosphere Monitoring Service*, yaitu model yang dikembangkan oleh badan prediksi cuaca Eropa (ECMWF) untuk menyediakan data prediksi polusi udara global.

CAMx : Singkatan dari *Comprehensive Air Quality Model with Extensions*, merupakan model untuk menyimulasikan kualitas udara dalam skala geografis yang beragam, dikembangkan oleh Ramboll Incorporation.

Catalytic converter : Alat pengkonversi polutan udara yang dipasang knalpot kendaraan bermotor.

Citizen science : Keterlibatan warga dalam penelitian ilmiah, sering kali melalui pengumpulan data, pengamatan, atau analisis, yang mendukung proyek ilmiah formal.

CMAQ : Singkatan dari *Community Multiscale Air Quality Model*, yaitu model numerik untuk menyimulasikan polusi atau kimia atmosfer yang dikembangkan oleh U.S. EPA.

Covid-19 : Penyakit menular yang disebabkan oleh virus SARS-CoV-2, pertama kali diidentifikasi pada akhir tahun 2019, dan menyebabkan pandemi global dengan dampak besar pada kesehatan, ekonomi, dan kehidupan sosial.

Dashboard : Tampilan grafis yang menyajikan data secara ringkas, memungkinkan pemantauan dan analisis cepat terhadap kinerja atau status suatu sistem.

Data Masukan Kondisi Cuaca : Data yang digunakan sebagai *input* dalam model polusi udara yang mencakup parameter cuaca, seperti kecepatan dan arah angin, temperatur, kelembapan, tekanan, dan curah hujan.

Data *real time* : Data saat ini yang sudah tersedia pada saat ini juga.

Detritivor : Hewan mikroorganisme yang berfungsi merombak bahan organik menjadi bahan anorganik.

Deposisi basah : Polutan udara yang terlarut dalam air hujan.

Deposisi kering: Bentuk pengendapan polutan udara yang berbentuk padatan (debu).

Diabetes melitus : Penyakit metabolik yang ditandai dengan kadar gula darah tinggi.

Disfungsi endotel : Gangguan fungsi lapisan dalam pembuluh darah.

EKC : *Environmental Kuznets Curve*, yaitu kurva yang menunjukkan hubungan antara kenaikan pendapatan dan emisi polutan yang menyebabkan degradasi lingkungan.

Ekosistem : Sistem atau komponen yang melakukan interaksi antara makhluk hidup dan lingkungannya.

Electrostatic precipitator : Alat pengendali polutan parikel

El Nino : Fenomena iklim yang ditandai dengan pemanasan suhu permukaan laut secara berkala di Samudra Pasifik tropis bagian tengah dan timur.

Energi terbarukan : Sumber energi yang dapat diperbarui secara alami.

European Environment Agency (EEA) : Badan Uni Eropa yang bertugas memberikan informasi independen tentang lingkungan untuk mendukung pengembangan kebijakan yang efektif.

Fiksasi nitrogen: Pengikatan gas nitrogen (N_2) oleh bintil akar tanaman kacang-kacangan.

Filterpack : Metode pengambilan sampel udara dalam bentuk gas dan aerosol, yaitu udara dilewatkan melalui filter dengan bantuan pompa.

Gangguan mental : Kondisi yang memengaruhi pikiran, perasaan, atau perilaku.

Gas rumah kaca : Gas-gas di atmosfer yang menyerap dan memancarkan radiasi inframerah yang menyebabkan efek rumah kaca. Efek rumah kaca ini adalah proses ketika radiasi dari permukaan bumi yang dipanaskan oleh sinar matahari diserap dan dipancarkan kembali oleh gas-gas di atmosfer, sehingga meningkatkan suhu permukaan bumi dan lapisan atmosfer bagian bawah.

Global cooling : Sebuah dugaan, terutama pada tahun 1970-an, tentang pendinginan bumi yang akan segera terjadi dan berpuncak pada periode glasiasi yang luas, akibat efek pendinginan dari aerosol atau gaya orbital.

Grid atau Pixel : Sistem koordinat yang digunakan dalam pendekatan Eulerian untuk membagi area yang diteliti menjadi sel-sel kecil untuk perhitungan proses fisis dan kimia.

Habitat : Tempat hidup makhluk hidup.

Hidrokarbon : Senyawa organik yang hanya terdiri atas atom karbon (C) dan hidrogen (H) sebagai komponen dasar dari banyak bahan bakar fosil dan bahan kimia organik.

Higroskopis : Zat-zat yang memiliki sifat menyerap air.

Host : Penjamu, yaitu organisme (manusia atau hewan) yang menjadi tempat tinggal dan berkembang biaknya agen penyebab penyakit (virus, bakteri, dsb.), yang dapat mengalami maupun tidak mengalami gejala penyakit.

HYSPLIT : Kependekan dari *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model*, yaitu model untuk

menyimulasikan trajektori parsel udara termasuk polutan, arah penyebarannya, perubahan kimia, dan perpindahannya di atmosfer.

Indoor : Segala lokasi yang terdapat di dalam ruangan.

Interoperabilitas antarplatform : Kemampuan berbagai sistem atau aplikasi untuk bekerja sama, berbagi data, dan menggunakan informasi secara lintas platform atau organisasi.

Inversi : Kondisi anomali pada lapisan troposfer, yaitu makin tinggi lokasi/ketinggian, makin panas suhunya; sedangkan pada kondisi normal di lapisan troposfer, makin tinggi lokasi/ketinggian, makin dingin suhunya.

IoT : *Internet of Things*, yaitu jaringan perangkat fisik yang terhubung ke internet, memungkinkan mereka untuk mengumpulkan dan berbagi data secara otomatis.

ISPA : Infeksi saluran napas akut, salah satu dampak polusi udara.

Jaringan pesepeda : Infrastruktur untuk pengendara sepeda.

Jaringan Sensor: Sistem yang terdiri atas berbagai sensor yang saling terhubung untuk memantau dan mengumpulkan data dari lingkungan atau sistem tertentu.

Kabut asam : Kumpulan titik-titik air yang berada di dekat permukaan tanah dan mengandung zat kimia yang bersifat asam.

Kabut asap : Fenomena atmosfer berupa campuran asap dan kabut.

Karbon dioksida (CO_2) : Gas rumah kaca yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil dan proses industri, berkontribusi pada perubahan iklim.

Karbon Monoksida (CO) : Gas tidak berwarna dan tidak berbau yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil yang tidak sempurna. Gas ini dapat mengurangi jumlah oksigen yang dibawa oleh darah.

Kardiovaskular : Berkaitan dengan jantung dan pembuluh darah.

Karnivora : Hewan pemakan daging.

Karsinogenik : Zat-zat yang dapat mengakibatkan penyakit kanker.

Keberlanjutan lingkungan : Upaya untuk memenuhi kebutuhan saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka, terutama dalam hal penggunaan sumber daya alam.

Kognitif anak : Kemampuan berpikir dan memahami pada anak-anak.

Kolokasi : Penempatan peralatan atau sensor di lokasi yang sama untuk mengukur parameter lingkungan secara bersamaan.

Komposit : Material yang terdiri atas dua atau lebih bahan berbeda yang digabungkan untuk mendapatkan sifat yang lebih baik dari setiap bahan.

Kondensasi : Proses perubahan wujud dari gas menjadi cair

Konduktivitas : Daya hantar listrik atau kemampuan suatu material untuk menghantarkan listrik atau panas.

Konektivita : Kemampuan perangkat atau sistem untuk terhubung dan berkomunikasi satu sama lain melalui jaringan.

Kontaminan : Zat atau polutan yang mencemari udara, termasuk partikel halus, gas beracun seperti oksida nitrogen, dan senyawa organik yang mudah menguap

Korosif : Sifat suatu bahan yang dapat menyebabkan kerusakan pada bahan lain terutama logam, melalui reaksi kimia.

Kota hijau : Konsep kota yang berfokus pada keberlanjutan, dengan penggunaan teknologi ramah lingkungan dan infrastruktur yang mendukung gaya hidup yang sehat dan efisien.

Kromatografi Ion : Teknik analisis yang memisahkan ion berdasarkan interaksi dengan resin penukar ion.

Kualitas udara dalam ruang : Aspek kesehatan lingkungan yang penting, melibatkan polutan udara dalam ruang dan faktor-faktor yang memengaruhinya.

Langit biru : Program dari Kementerian Lingkungan Hidup untuk meminimalkan polutan udara.

Leaching : Pencucian unsur hara yang terdapat dalam tanah oleh air hujan.

Light emitting diode : Cahaya yang dihasilkan karena emisi suatu benda.

Logam berat : Contoh polutan yang berasal dari kegiatan dalam ruangan atau infiltrasi udara luar, seperti arsenik, kadmium, dan timbal.

Machine learning : Subbidang dari AI yang berfokus pada pengembangan algoritma yang memungkinkan komputer untuk belajar dari data dan membuat prediksi atau keputusan tanpa diprogram secara eksplisit.

Metal-Oxide Semiconductor (MOS) : Teknologi untuk pengukuran konsentrasi gas dan massa partikulat.

Mitigasi : Tindakan atau upaya yang dilakukan untuk mengurangi atau menghilangkan dampak negatif dari suatu kejadian atau situasi.

Model Polusi Udara Global : Model untuk menyimulasikan kimia atmosfer atau polusi udara dengan domain wilayah secara global.

Model prediksi : Alat atau algoritma yang digunakan untuk memprediksi hasil atau tren masa depan berdasarkan data historis.

Multifaset : Sesuatu yang memiliki banyak aspek, dimensi, atau fitur yang berbeda. Istilah ini sering digunakan dalam berbagai konteks untuk menunjukkan kompleksitas atau keragaman dalam suatu sistem, objek, atau konsep.

Nitrat (NO^{3-}) : Dalam konteks polusi udara, nitrat biasanya merujuk pada senyawa yang terkait dengan nitrogen oksida (NO_x). Nitrat dalam polusi udara terutama berasal dari nitrogen oksida yang dihasilkan dari aktivitas manusia dan proses industri. Nitrat dapat membentuk partikel halus di atmosfer, yang berkontribusi pada penurunan kualitas udara dan dampak negatif pada kesehatan manusia dan lingkungan.

Nitrifikasi : Proses biologis yang merupakan bagian dari siklus nitrogen, yaitu proses pengoksidasian senyawa amonia menjadi nitrat oleh bakteri.

NO_2 : Nitrogen dioksida, gas beracun yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil, yang dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan dan lingkungan.

NO : Nitrogen monoksida, gas tidak berwarna yang terbentuk dari pembakaran bahan bakar pada suhu tinggi, seperti dalam mesin kendaraan dan pembangkit listrik.

No_x : Nitrogen oksida, senyawa yang terdiri atas nitrogen dan oksigen. Dua bentuk utama dari NO_x yang sering dibahas adalah NO dan $NO_{2.}$

NMHC : *Non-methane hydrocarbon*: golongan polutan udara hidrokarbon yang bukan metana.

Offline Model : Model polusi udara yang terpisah dari model cuaca dan membutuhkan data masukan dari model cuaca lain.

Oksidan : Dalam konteks polusi udara, oksidan merujuk pada senyawa kimia yang dapat menyebabkan oksidasi pada komponen lain di atmosfer, yang sering kali merugikan kesehatan manusia dan lingkungan. Oksidan dalam polusi udara biasanya mencakup ozon (O_3) dan peroksiasetil nitrat (PAN).

Online Model : Model polusi udara yang terintegrasi dengan model cuaca dalam satu sistem.

OSHA : *Occupational Safety and Health Administration*, suatu lembaga di departemen tenaga kerja Amerika Serikat yang bertugas menegakkan berbagai undang-undang dan peraturan.

Outdoor : Segala lokasi yang terdapat di alam terbuka.

O_3 (Ozon) permukaan : Gas berbahaya yang terbentuk akibat reaksi sinar matahari dengan polutan seperti nitrogen oksida dan senyawa organik volatil.

PAN : Peroksiasetil nitrat, terbentuk dari reaksi antara nitrogen oksida (NO_x) dan senyawa organik volatil (VOC) di atmosfer, terutama dari emisi kendaraan bermotor dan proses industri.

Parasitisme : Sifat jenis makhluk hidup yang merugikan makhluk hidup lain.

Particulate Matter (PM) : Partikel atau tetesan kecil di udara. Materi partikulat dikategorikan berdasarkan ukuran, seperti PM_{10} (partikel dengan diameter 10 μm atau kurang) dan $PM_{2.5}$ (partikel dengan diameter 2.5 μm atau kurang) nitrogen oksida.

Passive sampler : Metode pengambilan sampel udara dengan menggunakan filter dan larutan penyerap, yang memungkinkan udara melewati filter secara alami melalui proses difusi.

Pendekatan Eulerian : Pendekatan dalam model polusi udara yang menggunakan sistem grid dalam satu set koordinat ortogonal untuk mendefinisikan atau menjelaskan proses atmosfer, sumber emisi, dan proses kimia serta destruksi.

Pendekatan Lagrangian : Pendekatan dalam model polusi udara yang menggambarkan pergerakan parsel udara (atau *puff*) sepanjang lintasan dan mempertahankan kondisinya selama jalur pergerakannya.

Pengukuran *in situ* : Pengukuran secara langsung pada lokasinya.

Pengukuran *system remote* : Pengukuran yang dilakukan dari jarak jauh.

Perosot : Sinker, segala objek atau materi yang dapat menyerap karbon.

Pestisida : Zat pembunuh hama

Peta Jalan Kualitas Udara Dalam Ruang : Dokumen rencana pemerintah Indonesia untuk mengelola kualitas udara dalam ruang hingga tahun 2030.

pH : Skala yang digunakan untuk mengukur keasaman atau kebasaan suatu larutan, dengan skala dari 0 (sangat asam) hingga 14 (sangat basa).

PPOK : Penyakit paru obstruktif kronik, adalah istilah yang mencakup kelompok penyakit paru yang menyebabkan obstruksi atau penyempitan saluran pernapasan secara progresif, yang membuat sulit untuk bernapas.

Polisiklik Aromatik Hidrokarbon (PAH) : Sekelompok senyawa organik yang terdiri atas beberapa cincin benzena yang bergabung. PAH adalah polutan udara yang signifikan dan dikenal karena sifatnya yang karsinogenik dan mutagenik.

Polutan Primer: Polutan yang dilepaskan langsung dari sumber seperti kendaraan, proses industri, dan pembangkit listrik.

Polutan reakif : Polutan yang sifat kimianya mudah bereaksi dengan senyawa lain.

Polutan sekunder : Polutan yang tidak dilepaskan langsung, tetapi terbentuk di atmosfer melalui reaksi kimia dari polutan primer, misalnya ozon.

Polutan : Zat atau agen yang mencemari lingkungan dan dapat menyebabkan kerusakan pada ekosistem, kesehatan manusia, atau kualitas hidup.

Porositas : Ukuran dari jumlah ruang kosong (pori-pori) dalam suatu material dibandingkan dengan volume total material tersebut.

Polutan inert : Polutan yang sifat kimianya susah bereaksi dengan senyawa lain.

Presipitasi : Proses pengendapan air dari atmosfer ke permukaan bumi dalam bentuk hujan, salju, hujan es, atau kabut.

Pyrochlastic flow : Aliran potongan lava padat, abu vulkanik, dan gas panas yang padat dan bergerak cepat.

Radikal Hidroksil (•OH)	:	Bentuk radikal bebas dari gugus hidroksil. Dalam bentuk ini, satu atom oksigen dan satu atom hidrogen terikat bersama, tetapi ada satu elektron tak berpasangan pada atom oksigen, membuatnya sangat reaktif.
Radon	:	Gas radioaktif yang ditemukan dalam ruangan dari tanah atau air hasil peluruhan zat radioaktif lainnya.
Redundansi	:	Penerapan sistem cadangan atau duplikasi elemen kritis untuk memastikan ketersediaan dan kelangsungan layanan jika terjadi kegagalan.
Ring of fire	:	Jalur di sekitar tepi Samudra Pasifik yang berisi sebagian besar gunung berapi di bumi.
Rural	:	kawasan wilayah pedesaan.
Schrubber	:	Pengendali polutan udara yang dipasang pada cerobong industri.
Sensor	:	Perangkat yang digunakan untuk memantau polutan udara dan kondisi iklim mikro secara *real time*.
Silent killer	:	Istilah untuk kondisi berbahaya yang tidak menunjukkan gejala jelas.
Sistem Informasi (SI)	:	Kumpulan komponen yang saling berhubungan yang digunakan untuk mengumpulkan, memproses, menyimpan, dan mendistribusikan informasi untuk mendukung pengambilan keputusan dan kontrol dalam organisasi.
Sistem Kualitas Udara Global	:	Sistem yang mengoordinasikan data dan informasi dari berbagai negara untuk memantau kualitas udara secara global, sering kali melibatkan kerja sama internasional.

Sistem Pemantauan dan Peringatan Dini : Sistem yang dirancang untuk memantau kondisi tertentu secara terus-menerus dan memberikan peringatan jika terdeteksi potensi ancaman atau bahaya, seperti polusi udara atau bencana alam.

Sistem pernapasan : Organ-organ yang terlibat dalam proses bernapas.

Sistem saraf pusat : Otak dan sumsum tulang belakang.

Smart City : Konsep kota yang menggunakan teknologi informasi dan komunikasi untuk meningkatkan efisiensi layanan publik, mengelola sumber daya secara efektif, dan meningkatkan kualitas hidup warganya.

Smog : Singkatan dari *smoke* dan *fog*, suatu jenis polusi udara yang ditandai dengan campuran asap, kabut, dan polutan kimia.

Smog Fotokimia: Jenis *smog* yang terbentuk ketika sinar matahari bereaksi dengan polutan seperti nitrogen oksida dan senyawa organik volatil. Biasanya mengakibatkan pembentukan ozon permukaan dan umum terjadi di daerah perkotaan.

SO_2 : Sulfur dioksida, yakni gas yang dihasilkan dari pembakaran biomassa dan bahan bakar fosil.

Spasial : Berkaitan dengan ruang atau posisi dalam ruang, sering digunakan dalam konteks distribusi geografis.

Spektrofotometri : Metode analisis yang mengukur jumlah cahaya yang diserap oleh suatu larutan pada panjang gelombang tertentu.

Stroke : Gangguan suplai darah ke otak.

Superkomputer atau Server : Komputer dengan kapasitas komputasi yang sangat besar yang diperlukan untuk menjalankan model polusi udara dengan pendekatan Eulerian.

Simbiosis : Hubungan interaksi antara dua jenis makhluk hidup.

Tata ruang kota : Proses perencanaan dan pengaturan penggunaan lahan di kota untuk mendukung pembangunan yang berkelanjutan dan efisien, termasuk perencanaan infrastruktur, perumahan, dan ruang hijau.

Teknologi nirkabel : Teknologi yang memungkinkan transmisi data tanpa menggunakan kabel, seperti *Wi-Fi, Bluetooth*, dan jaringan seluler.

Transboundary haze pollution : Pencemaran kabut asap yang asal fisiknya terletak seluruhnya atau sebagian di dalam wilayah yurisdiksi nasional satu negara anggota dan yang diangkut ke wilayah yurisdiksi negara anggota lain.

UNEP : *United Nations Environment Programme*, badan PBB untuk lingkungan.

*Urban heat island (*pulau panas perkotaan) : Daerah di kota yang memiliki suhu udara lebih tinggi daripada daerah di sekitarnya secara permanen.

Urban : Kawasan wilayah perkotaan.

USGS : *United State Geological Survey*, yaitu organisasi riset di Amerika Serikat terkait dengan biologi, geologi, geografi, dan perairan.

VEI : *Volcanic Eruption Index*, skala numerik yang mengukur ukuran relatif ledakan dari letusan gunung berapi dan sejarah letusan.

Visibilitas : Daya jangkauan melihat suatu objek.

Visualisasi data: Proses menampilkan data dalam bentuk grafik, diagram, atau peta untuk memudahkan pemahaman, analisis, dan komunikasi informasi.

VOC : *Volatile organic compound* VOC, jenis senyawa organik yang mudah menguap.

WHO : *World Health Organzation*, salah satu organisasi dalam naungan PBB yang bergerak dalam bidang Kesehatan.

WRF-Chem (*Weather Research Forecast-Chemistry Model*) : Model numerik untuk memprediksi dan meneliti cuaca serta kimia atmosfer yang dikembangkan oleh beberapa lembaga riset di Amerika Serikat.

Zooplankton : Hewan berukuran amat kecil (mikro) yang terdapat di perairan (badan air di darat dan laut).

Biodata Editor

Sumaryati, lahir di Sleman tahun 1967, peneliti Ahli Madya di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Menamatkan pendidikan di Yogyakarta dari Sekolah Dasar sampai pendidikan sarjana jurusan Fisika, UGM tahun 1992. Pada tahun 1994 bergabung dengan Pusat Penelitian dan Pengembanagn Atmosfer, LAPAN dan kemudian melanjutkan pendidikan di jurusan Teknik Lingkungan ITB lulus tahun 2007. Tahun 2021 LAPAN berintegrasi dengan lembaga riset lain menjadi (BRIN). Ketertarikan penelitian pada Bidang terkait dengan Polusi udara, khususnya meteorologi polusi udara. Buku yang pernah ditulis berjudul *Tujuh Lapisan Atmosfer dalam Menopang Habitabiltas Bumi* (Rosda, 2020) dan *Spiritual Kitchen* (Al Bayan 2005). E-mail: suma011@brin.go.id atau sumary.bdg@gmail.com

Lilik Slamet Supriatin adalah Peneliti Ahli Madya di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Organisasi Riset Kebumian dan Maritim, Badan Riset dan Inovasi Nasional. Ia menyelesaikan pendidikan doktor di Program Studi Ilmu Lingkungan, Universitas Indonesia, pada tahun 2014. Ia memiliki fokus riset terkait kimia atmosfer dan perubahan iklim serta aplikasinya. E-mail: lili012@brin.go.id.

Biodata Penulis

Wiwiek Setyawati. Lahir di Jakarta pada 9 November 1973 dan memulai karier sebagai peneliti di Lembaga Penerbangan dan Antariksa (LAPAN). Saat ini, penulis bekerja sebagai peneliti di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer (PRIMA), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Menyelesaikan Pendidikan sarjana dari Teknik Kimia Sheffield University pada tahun 1998, Magister dan Doktoral dari Teknik Lingkungan ITB pada tahun 2007 dan 2017. Ketertarikan riset saat ini di bidang kimia atmosfer dan kualitas udara, terutama dinamika dan dampak polusi udara dan gas rumah kaca, serta kaitannya dengan perubahan iklim. Email: wiwi007@brin.go.id

Saipul Hamdi Lahir dan menghabiskan masa kecilnya di Desa Sungai Gerong, Palembang, Sumatra Selatan pada tanggal 16 Januari 1968. Menamatkan program Sarjana (1986–1992) di Institut Teknologi Bandung jurusan FMIPA Fisika, Bergabung dengan Puslitbang Pengetahuan Atmosfer LAPAN pada tahun 1991 melalui jalur beasiswa ikatan dinas, dan berkesempatan melanjutkan program magister di Nagoya University of Japan (2000–2003) melalui Ronpaku Program. Tertarik dengan fisika atmosfer sejak bergabung dengan LAPAN, dan menggeluti penelitian yang terkait dengan radiasi matahari dan karakternya ketika memasuki lapisan atmosfer bumi. Lapisan ozon dan aerosol juga menjadi obyek yang diteliti selama bertahun-tahun dalam interaksinya dengan radiasi ultraviolet matahari dan radiasi global. Beberapa karya tulis ilmiah telah dihasilkan baik dalam bentuk prosiding, bunga rampai, maupun jurnal; baik yang berskala nasional maupun internasional bereputasi. Saat ini, penulis merupakan peneliti ahli madya di PR Iklim dan Atmosfer BRIN. E-mail: *saip001@brin.go.id*.

Novita Ambarsari, dilahirkan pada tanggal 23 November 1984 di Bandung. Pada tahun 2003, penulis menempuh studi sarjana di Program Studi Kimia FMIPA ITB dan lulus pada tahun 2007. Pada tahun 2008, penulis mulai bekerja sebagai peneliti di Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer-LAPAN. Penulis melanjutkan studi S2 pada Program Pascasarjana ITB dengan pembiayaan dari beasiswa Kementrian Riset dan

Teknologi di Program Studi Teknik Lingkungan pada tahun 2011 dan memperoleh gelar Magister Teknik (M.T) pada tahun 2013. Pada tahun 2018, penulis melanjutkan studi S3 di Program Doktor Kimia Analitik Sekolah Pascasarjana ITB yang dibiayai oleh beasiswa Saintek Kementrian Riset dan Teknologi dilanjutkan sebagai beasiswa BRIN dan lulus pada tahun 2023 kemudian aktif bekerja kembali sebagai periset di Pusat Riset Iklim Atmosfer, Organisasi Riset Kebumian dan Maritim, BRIN hingga sekarang. Fokus penelitian penulis terutama di bidang komposisi atmosfer dan polusi udara berbasis pengukuran lapangan dan laboratorium yang didukung dengan data-data observasi satelit dan model. Email: novita.ambarsari@brin.go.id

Ninong Komala Lahir di Bandung pada 18 September 1957. Penulis menyelesaikan Program Sarjana di Jurusan Kimia di Fakultas Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran Bandung pada tahun 1983. Penulis bekerja di Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) pada tahun 1984 di Bidang Pengkajian Ozon dan Polusi Udara, Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer. Program Master di Jurusan Geofisika Universitas Tokyo Jepang tahun 1989, dan program Doktor di Jurusan Earth and Planetary Physics Universitas Tokyo tahun 1997. Penulis melakukan Orasi Profesor Riset "Pemantauan Ozon berbasis Data Satelit dan *Insitu* untuk Deteksi Penipisan Lapisan Ozon di Indonesia pada bulan November 2019. Pada tahun 2022 LAPAN bergabung dengan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Penulis bergabung di Kelompok Riset Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya pada Pusat Riset Iklim dan Atmosfer. Email: nino001@brin.go.id.

Indra Chandra lahir di Tasikmalaya pada tahun 1981. Menyelesaikan pendidikan sarjana dan master di bidang Fisika, dengan fokus Instrumentasi dan Kontrol, di Institut Teknologi Bandung (2000–2007). Pada periode 2014–2017, melanjutkan studi dan riset di Kanazawa University, Jepang, dengan topik "*Atmospheric Nanoparticles*". Gelar Insinyur (Ir.) diperoleh pada tahun 2022. Sejak tahun 2008 hingga sekarang, Indra Chandra berprofesi sebagai Dosen di Universitas Telkom. Bidang penelitian yang ditekuni meliputi pencemaran udara dan air hujan, *carbon footprint* dan *carbon stocks*, manajemen kebencanaan, serta pengembangan mikrosensor dan instrumentasi lingkungan. E-mail: indrachandra@telkomuniversity.ac.id

Dyah Aries Tanti adalah peneliti yang memiliki ketertarikan pada bidang kualitas udara dan lingkungan atmosfer. Penulis menyelesaikan pendidikan D-3 Teknik Kimia di Universitas Diponegoro, Semarang, pada tahun 2004, kemudian melanjutkan studi S-1 Kimia di Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Achmad Yani. Sejak tahun 2008, penulis bekerja di Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN). Selanjutnya, pada tahun 2022, penulis bekerja sebagai perekayasa di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Saat ini, penulis sedang menempuh pendidikan S-2 pada Program Magister Ilmu Lingkungan, Universitas Padjadjaran. Fokus riset penulis mencakup kajian kualitas udara, serta dinamika lingkungan atmosfer. Email: dyah.ariestanti@brin.go.id

Asri Indrawati adalah periset di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Organisasi Riset Kebumian dan Maritim, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), dengan bidang kepakaran Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya. Penulis menyelesaikan pendidikan Diploma (D-3) di Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Kimia, Universitas Diponegoro pada tahun 2004; pendidikan Sarjana (S-1) di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Program Studi Kimia, Universitas Jenderal Achmad Yani pada tahun 2009; serta pendidikan Magister (S-2) di Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung pada tahun 2014. Fokus riset penulis mencakup kajian kualitas udara, pencemaran atmosfer, dan dinamika lingkungan atmosfer, termasuk aplikasinya dalam mendukung pengelolaan lingkungan dan kesehatan. Penulis telah memublikasikan berbagai hasil penelitian pada jurnal nasional dan internasional. E-mail: asri.indrawati@brin.go.id atau asriku@gmail.com

Nindia Noviastuti lahir di kota Bekasi pada 10 November 1994. Setelah itu, penulis menghabiskan masa kecilnya di Semarang. Penulis menyelesaikan program diploma tiga di Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro pada tahun 2015 dan menyelesaikan program sarjana di Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Ahmad Yani pada tahun 2025. Sejak tahun 2019, penulis bekerja di Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Banten, Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi

Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian. Terhitung sejak Juni 2022, penulis melanjutkan tugasnya di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). *Email*: nind002@brin.go.id

Nur Faizah Romadona, lahir pada 29 November 1970, menyelesaikan pendidikan sarjana Kedokteran dan profesi dokter di Universitas Diponegoro (UNDIP). Selanjutnya, ia menempuh pendidikan magister Gizi Medik serta magister Mikrobiologi di Universitas Padjadjaran (UNPAD), Bandung, dan meraih gelar doktor di Universitas Pendidikan Indonesia (UPI), Bandung. Saat ini, ia menjabat sebagai dosen dan peneliti pada Program Studi Sarjana Kedokteran, Fakultas Kedokteran, UPI. Dalam kiprah akademik dan profesionalnya, Dr. dr. Nur Faizah Romadona, M.Kes., M.Biomed, aktif melaksanakan penelitian dan pengabdian kepada masyarakat yang berfokus pada bidang mikrobiologi, serta kesehatan dan gizi anak. Selain itu, ia juga terlibat dalam berbagai kegiatan akademik, termasuk pembimbingan mahasiswa di lingkungan Fakultas Kedokteran dan PGPAUD UPI. E-mail: faizah@upi.edu

Waluyo Eko Cahyono adalah peneliti pada Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Organisasi Riset Kebumian dan Maritim, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Ia menyelesaikan pendidikan sarjana (S1) pada Jurusan Biologi Lingkungan, Fakultas Biologi, Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga dan lulus pada

tahun 1989, serta melanjutkan pendidikan magister (S2) pada Program Magister Ilmu Lingkungan, Universitas Padjadjaran dan lulus pada tahun 2012.

Dalam perjalanan akademik dan profesionalnya, Waluyo Eko Cahyono telah mengikuti berbagai pelatihan, lokakarya, dan konferensi ilmiah, baik di dalam maupun di luar negeri, antara lain di Chung-Li, Taiwan, Kyushu, Jepang, Melbourne, Australia, London, Inggris, dan Colorado, Amerika Serikat. Ia juga memiliki pengalaman internasional sebagai peneliti tamu di Osaka University, Jepang, pada Mei 2019, serta sebagai peneliti tamu di University of Göttingen, Jerman, pada November 2019.

Topik penelitian utamanya meliputi kualitas udara dan gas rumah kaca, khususnya yang berkaitan dengan dampaknya terhadap manusia dan lingkungan. Hingga saat ini, ia aktif terlibat dalam berbagai penelitian mengenai polusi udara, interaksi biosfer–atmosfer, perubahan iklim dan pembangunan berkelanjutan di Indonesia.

Email : walu002@brin.go.id

Atep Radiana,ST.,MAP yang lahir di Bandung pada tanggal 26 Oktober 1968. Meskipun lahir di kota Bandung, semasa kecilnya menetap dan menempuh pendidikan SD, SMPnya di kota kecil Cimahi. Awal mula karier penulis sebagai birokrat dimulai pada tahun 1992 sebagai Pegawai Negeri Sipil pusat yang penugasan pertamanya ditempatkan pada Pemerintah Daerah Provinsi Sumatra Selatan. Selama bertugas, penulis pernah menduduki jabatan struktural sebagai Kepala Subbid Perubahan Iklim, Kepala Seksi Mutu di Laboratorium Lingkungan, Kepala

Subbid Kemitraan dan Peran Serta Masyarakat, serta Kasubbid Pengendalian dan Pencemaran Lingkungan.

Tidak puas dengan kemampuan yang dimiliki dan memutuskan untuk melanjutkan pendidikan pascasarjana di STIA LAN Bandung pada tahun 2007. Meskipun latar belakang S2 berbeda dengan disiplin ilmu S1, atas pengalaman yang dimiliki, penulis mampu mengadopsi dan mengembangkan keahliannya di bidang lingkungan atmosfer dan aplikasinya.

Dengan latar belakang sebagai pejabat yang pernah membidangi dan menekuni permasalahan pengendalian dan pencemaran lingkungan, penulis mampu mengembangkan kemampuan teknis bahkan mampu mengaplikasikan dalam inovasi kerekayasaan, jadi tidak heran selama menekuni bidang lingkungan atmosfer dan aplikasinya. beberapa karya tulis terkait lingkungan telah penulis tuangkan dalam karya tulisnya, sedangkan selaku inventor Hasil Kekayaan Intelektual telah tersertifikasi.

Di tahun 2021, penulis bergabung pada Pusat Riset Iklim dan Atmosfer -BRIN dengan tugas pokok dan fungsinya meliputi penelitian di bidang perubahan iklim, dinamika atmosfer, dan fenomena cuaca ekstrem sehingga dapat memahami dampaknya terhadap lingkungan dan masyarakat, selain itu melakukan pengembangan teknologi dan sistem informasi untuk memantau dan memprediksi kondisi iklim dan atmosfer, yang akhirnya dapat berperan aktif dalam mitigasi dampak perubahan iklim. Penulis berusaha untuk dapat memberikan kontribusi pada pengembangan dan inovasi teknologi bidang iklim dan atmosfer sebagai rasa syukur atas ilmu, Ilmu dan kelebihan yang telah Allah Swt sematkan dan digunakan penulis sebagai lahan ibadah untuk kepentingan orang banyak.
Email: atep001@brin.go.id

Amalia Nurlatifah adalah periset di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Badan Riset dan Inovasi Nasional yang lahir di Bandung, 6 Agustus 1992. Penulis menghabiskan masa S1 di Program Studi Meteorologi, Institut Teknologi Bandung (ITB), S2 di Teknik Lingkungan ITB, dan saat ini sedang menempuh studi di Department of Mathematics and Statistics, University of Exeter. Penulis merupakan *ekspert* di bidang klimatologi termasuk di dalamnya pemodelan perubahan iklim dan polusi udara. Selama berkarnya sebagai peneliti, penulis telah menghasilkan lebih dari 60 karya ilmiah dan lebih dari 50%-nya terindeks scopus. Email: an684@exeter.ac.uk atau amalia.nurlatifah@brin.go.id

Prawira Yudha Kombara lahir di Kota Bandung pada tanggal 4 Oktober 1992. Penulis telah menyelesaikan pendidikan tingginya di Program Studi Meteorologi, Institut Teknologi Bandung (ITB) pada 1 Agustus 2015 untuk program sarjana dan Program Studi Sains Kebumian di kampus yang sama pada 20 Juli 2019 untuk program magister. Saat ini, penulis bekerja sebagai peneliti di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Badan Riset dan

Inovasi Nasional (BRIN). Untuk topik penelitian, penulis fokus melakukan penelitian mengenai polusi udara, lebih spesifik perihal simulasi Partikulat Matter ukuran 2.5 microgram/m^3 ($PM_{2.5}$) dengan menggunakan model numerik untuk di kota-kota besar di Indonesia, seperti wilayah Jakarta dan Bandung. Hasil dari penelitian tersebut, beberapa di antaranya telah diterbitkan, baik dalam bentuk prosiding, bagian dari buku, jurnal nasional, maupun jurnal internasional. E-mail: praw005@brin.go.id

Emmanuel Adetya lahir pada 17 Februari 1981. Penulis menyelesaikan program sarjana di jurusan Teknik Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Nasional Pasim, pada 2012. Pada tahun 2017, penulis memperoleh beasiswa dari Kemenristekdikti untuk melanjutkan program magister di Departement of Computer Science, Kyungsung University, Korea Selatan. Penulis memperoleh gelar Master of Science pada tahun 2019 pada Program Studi Master of Science in Computer Engineering, dengan judul tesis "*Implementation of Convolutional Neural Network to Handling Missing Value for Surface Ozone Data of Bandung, West Java, Indonesia*".

Penulis mengawali kariernya sebagai Teknisi Litkayasa di Pusat Pemanfaatan Sains Atmosfer dan Iklim (yang kelak menjadi Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer), Lembaga Penerbanganan Antariksa Nasional sejak tahun 2005 hingga tahun 2021. Pada tahun 2021, penulis berpindah fungsional menjadi Perekayasa Ahli Muda di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Organisasi Riset Kebumian dan Maritim, Badan Riset dan Inovasi Nasional, dengan bidang kepakaran "Lingkungan

Atmosfer dan Aplikasinya" serta "Pembelajaran Mesin" (*machine learning*) dengan fokus pada Pembelajaran Terawasi (*Supervised Learning*). Penulis juga menjadi dosen praktisi di Fakultas Teknik Elektro, Telkom University, sejak tahun 2022. Saat ini, penulis mengajar beberapa mata kuliah utama, seperti "Algoritma dan Pemrograman" dan "Pemrograman Python". E-mail: emma002@brin.go.id dan emmanuel.adetya@gmail.com

Indeks

aerosol 28, 37, 39, 50, 61, 100, 108, 109, 121, 122, 196, 200, 202, 203, 225, 240, 265, 284, 305
aldehida 40
asam nitrat 40
asap 40

bahan bakar fosil xv, 39, 40, 43, 56, 57, 108, 111, 122, 124, 142, 161, 249, 251, 267, 280, 284, 286, 289, 294
batu bara 10, 37, 38, 39, 46, 113, 142, 199, 281

dampak xv, xvi, xvii, xviii, xix, 11, 12, 21, 24, 26, 27, 28, 29, 42, 49, 56, 59, 61, 65, 70, 71, 80, 81, 83, 84, 93, 94, 95, 113, 116, 117, 119, 122, 123, 131, 132, 133, 136, 139, 140, 141, 143, 144, 146, 148, 149, 159, 161, 162, 163, 170, 171, 173, 174, 175, 177, 178, 181, 182, 184, 186, 192, 193, 194, 195, 197, 198, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 220, 221, 230, 237, 244, 245, 247, 248, 249, 252, 253, 260, 264, 265, 266, 268, 269, 271, 282, 285, 288, 299, 307
Dampak vi, vii, viii, ix, xi, xii, xiii, xix, 4, 12, 13, 26, 32, 49, 50, 65, 67, 68, 70, 93,

116, 117, 120, 121, 127, 129, 135, 136, 137, 139, 143, 146, 149, 152, 160, 174, 189, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 201, 202, 204, 205, 208, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 218, 220, 221, 226, 264, 265, 266

emisi 6, 8, 12, 20, 24, 25, 26, 27, 28, 35, 37, 40, 41, 77, 79, 81, 83, 88, 89, 95, 107, 108, 111, 112, 113, 122, 123, 125, 128, 133, 140, 142, 143, 145, 146, 147, 149, 159, 161, 163, 166, 167, 169, 177, 184, 185, 186, 193, 194, 198, 203, 208, 220, 225, 228, 230, 233, 244, 248, 251, 253, 261, 266, 269, 270, 271, 272, 274, 279, 280, 283, 287, 290

fog 11, 12, 294
fotosintesis 49, 50, 71

hidroksil 37, 44, 292

iklim xi, 6, 14, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 38, 39, 41, 61, 68, 69, 80, 84, 85, 94, 95, 152, 160, 162, 163, 164, 166, 167, 168, 172, 184, 185, 192, 195, 199, 201, 202, 208, 209, 211, 219, 220, 222, 225, 234, 237, 265, 283, 286, 293, 297, 299, 306, 307, 308
Inversi Termal 41
iritasi mata 49, 50, 67, 79, 93, 108, 116, 121, 160, 199

kabut xv, 11, 12, 17, 18, 21, 27, 37, 39, 40, 42, 43, 49, 55, 72, 108, 109, 121, 132, 133, 160, 161, 162, 164, 165, 167, 169, 171, 172, 173, 174, 178, 179, 182, 184, 185, 186, 189, 197, 199, 234, 286, 292, 294, 295
karbon dioksida 1, 20, 38, 56, 70, 112, 118, 166, 167, 168, 245, 252
kebakaran hutan 7, 8, 9, 12, 17, 21, 27, 32, 40, 127, 145, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 179, 181, 182, 184, 185, 187, 189, 197, 200, 231, 234,

249, 253, 258, 264, 268
kecepatan angin 41, 42, 192, 194, 203, 210, 232, 233, 269
kesehatan masyarakat 22, 29, 31, 49, 50, 83, 84, 127, 140, 145, 146, 149, 159, 178, 244, 247, 249, 250, 251, 252, 256, 257, 260, 264, 279

lingkungan xvi, xvii, xix, 6, 7, 9, 12, 16, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 44, 49, 55, 65, 68, 71, 77, 78, 80, 83, 84, 85, 87, 88, 90, 91, 94, 95, 96, 107, 108, 113, 116, 123, 124, 125, 127, 128, 133, 143, 145, 146, 147, 148, 149, 159, 161, 163, 167, 170, 171, 173, 174, 181, 185, 186, 187, 189, 191, 192, 194, 195, 204, 206, 207, 220, 221, 223, 226, 228, 230, 236, 243, 244, 245, 247, 248, 249, 252, 253, 254, 256, 257, 258, 259, 260, 263, 265, 266, 267, 273, 274, 279, 281, 283, 285, 286, 287, 288, 289, 292, 295, 298, 299, 300, 301, 304, 306

material xv, 19, 49, 50, 60, 61, 77, 79, 87, 161, 167, 206, 257, 265, 269, 287, 292
meteorologi lokal 41

nitrat 37, 40, 48, 49, 50, 71, 111, 113, 120, 198, 206, 280, 288, 289, 290

oksidan 37, 39, 40, 128, 205, 289
ozon 9, 10, 27, 37, 39, 40, 41, 44, 46, 48, 49, 50, 78, 83, 95, 127, 130, 132, 133, 236, 238, 245, 250, 251, 252, 268, 270, 289, 292, 294, 305

partikel xvii, 6, 9, 11, 24, 26, 37, 38, 44, 49, 56, 64, 65, 78, 87, 95, 96, 108, 109, 110, 120, 128, 130, 131, 133, 134, 138, 139, 160, 161, 170, 171, 174, 192, 193, 196, 198, 204, 205, 206, 227, 249, 269, 279, 287, 288, 290
Partikulat 24, 120, 135, 197, 243, 304
petir 8

Polusi i, iii, iv, v, vii, viii, ix, x, xi, xii, xiii, xv, xvi, xvii, xix, 1, 8, 11, 13, 38, 46, 52, 107, 127, 128, 129, 131, 132, 135, 136, 137, 138, 141, 142, 143, 146, 148, 149, 152, 162, 174, 191, 192, 196, 202, 204, 208, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 221, 224, 227, 229, 237, 250, 263, 264, 265, 266, 270, 273, 288, 302, 309
polutan 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 17, 20, 27, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 46, 49, 50, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 109, 111, 112, 121, 122, 128, 130, 131, 132, 133, 135, 136, 140, 143, 145, 147, 153, 160, 161, 169, 170, 171, 172, 174, 184, 186, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 208, 209, 210, 211, 213, 214, 220, 228, 231, 232, 236, 238, 244, 245, 249, 250, 251, 252, 253, 257, 258, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 274, 280, 281, 282, 283, 285, 287, 289, 290, 291, 292, 293, 294
precursor 37, 100
presipitasi 41, 109

radiasi matahari 10, 39, 41, 192, 194, 196, 203, 305

sinar matahari 37, 39, 55, 68, 78, 113, 132, 201, 250, 284, 290, 294
Smog vi, x, xiii, 12, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 49, 50, 52, 53, 55, 294
smog asam 38
Smog Fotokimia vi, 37, 39, 40, 41, 43, 294
smog London 38, 39
Smog Polish 45
sulfur 9, 10, 25, 38, 39, 45, 50, 55, 57, 59, 61, 65, 66, 71, 72, 73, 78, 83, 103, 104, 108, 113, 116, 123, 127, 128, 130, 157, 199, 204, 206, 234, 269, 280
sulfur diokisda (SO2) 38

temperatur 2, 23, 37, 41, 45, 75, 78, 79, 85, 87, 91, 95, 233, 269, 282
topografi 10, 41, 174, 193, 203, 209, 210, 211, 230, 281

tutupan awan 41

visibilitas 50, 50–312, 133, 133–312, 159, 159–312, 172, 172–312, 195, 195–312, 196, 196–312, 196–312, 196–312, 196–312, 196–312, 196–312, 197, 197–312, 197–312, 197–312, 197–312, 197–312, 198, 198–312, 198–312, 198–312, 198–312, 215, 215–312, 215–312, 215–312, 215–312, 216, 216–312, 220, 220–312

VOC 5, 5–312, 5–312, 9, 9–312, 9–312, 26, 26–312, 26–312, 27, 27–312, 27–312, 37, 37–312, 37–312, 39, 39–312, 39–312, 41, 41–312, 41–312, 41–312, 41–312, 44, 44–312, 44–312, 44–312, 44–312, 44–312, 44–312, 46, 46–312, 46–312, 46–312, 46–312, 47, 47–312, 47–312, 49, 49–312, 49–312, 50, 50–312, 50–312, 78, 78–312, 78–312, 78–312, 78–312, 79, 79–312, 79–312, 81, 81–312, 81–312, 81–312, 81–312, 82, 82–312, 82–312, 85, 85–312, 85–312, 87, 87–312, 87–312, 87–312, 87–312, 87–312, 87–312, 87–312, 87–312, 89, 89–312, 89–312, 93, 93–312, 93–312, 99, 99–312, 99–312, 116, 116–312, 116–312, 130, 130–312, 130–312, 132, 132–312, 132–312, 132–312, 132–312, 290, 290–312, 290–312, 295, 295–312, 295–312, 295–312, 295–312

VOCs 100, 100–312, 101, 101–312, 104, 104–312, 154, 154–312

Polusi udara adalah perubahan komposisi udara akibat masuknya zat, energi, atau unsur lain yang mengubah karakter alami atmosfer, baik yang berasal dari sumber alami seperti erupsi gunung api maupun aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil dan kebakaran lahan gambut. Fenomena ini hadir dalam berbagai wujud—mulai dari *smoke, smog*, kabut vulkanik (vog), hingga deposisi asam—yang tidak hanya menurunkan kualitas udara, tetapi juga mengancam kesehatan manusia sebagai *silent killer*, merusak ekosistem dan material, serta menimbulkan pencemaran lintas batas negara. Kompleksitas dampak ini menuntut pemahaman menyeluruh, mulai dari akar penyebab hingga upaya pengendaliannya.

Buku *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* hadir untuk mengupas tuntas berbagai fenomena polusi udara—oksigen dan mekanisme pernapasan, *smoke*, *smog* dan *smog* fotokimia, vog, kualitas udara dalam ruang, deposisi asam, dampak kesehatan, *transboundary haze pollution*, dampak lingkungan, hingga pemodelan, sistem informasi, dan strategi pengendalian kualitas udara. Buku ini disusun secara sistematis dari berbagai perspektif keilmuan untuk memberikan gambaran komprehensif tentang polusi udara di Indonesia dan dunia. Buku ini bermanfaat sebagai sumber referensi bagi peneliti, akademisi, pembuat kebijakan, maupun masyarakat umum yang ingin memahami fenomena polusi udara secara mendalam serta upaya mitigasi dan pengendaliannya.

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Gedung B.J. Habibie Lt. 8,
Jln. M.H. Thamrin No. 8,
Kota Jakarta Pusat 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.1375

ISBN 978-634-7933-34-8