

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.



Gambar 12.1 Kabut asap di Malaysia dan Singapura Dampak dari Kebakaran di Indonesia Sumatra dan Kalimantan

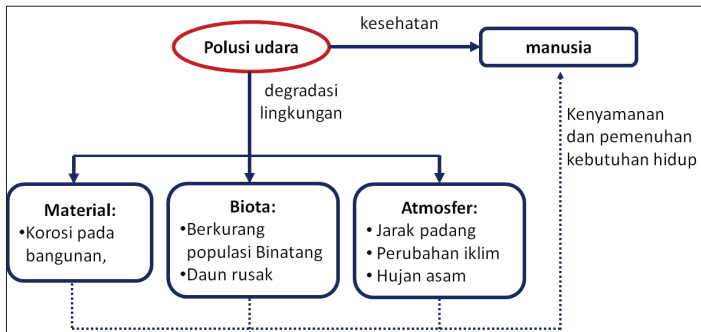
Dampak polusi udara yang bersifat langsung pada manusia adalah menurunkan kesehatan, baik dampak akut maupun kronis. Masyarakat umumnya dengan mudah memahami dampak akut, dampak yang langsung dirasakan ketika kita berada pada lingkungan udara kotor, seperti mata perih karena iritasi dan gangguan saluran 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 *silent 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 CO₂ dan CH₄ yang menyebabkan perubahan iklim, pada proses pembentukannya selalu disertai berbagai jenis polutan. Sifat kimia polutan udara ada yang bersifat korosif, seperti SO₂, 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 mereduksi 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 , $\text{PM}_{2.5}$, 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 pencampuran 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 pencampuran 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

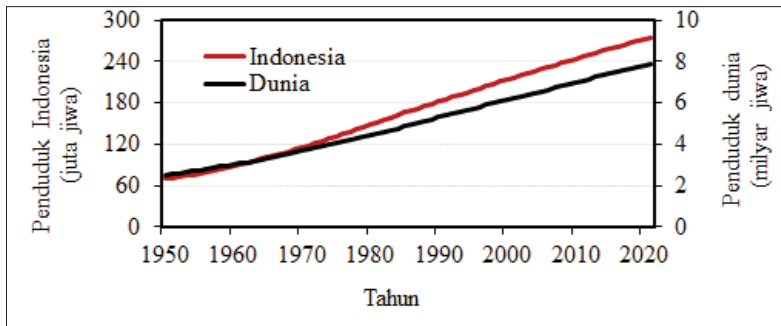
secara empiris, sekaligus dapat digunakan untuk membuktikan kajian teoritis dan hasil pemodelan polusi udara.

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 pertumbuhan sekitar 80 juta per tahun untuk seluruh penduduk dunia, dan 3 juta per tahun untuk penduduk Indonesia. Salah satu permasalahan akibat pertumbuhan 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.

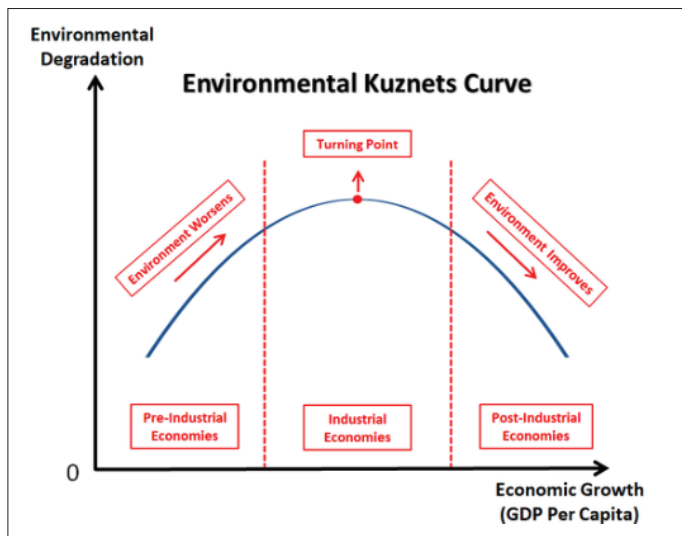
Pengembangan teknologi sensor dan *monitoring* dapat memberikan informasi kondisi kualitas udara secara *real time*. Alat *monitoring* polutan yang jangkauan ruangnya terbatas dapat dibantu dengan pengamatan satelit dan pemodelan yang mampu menggambarkan kondisi polutan secara spasial dan temporal secara 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/jeccis.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 PM_{2.5} 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>