

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 (SO_x), *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 tuberkulosis. Penelitian ini diperjelas dengan gambar 7.1 yang menjelaskan mekanisme kerusakan spesifik berdasarkan jenis polutannya. Gambar ini menunjukkan bahwa sulfur dioksida (SO_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 Kelaratuan 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;).

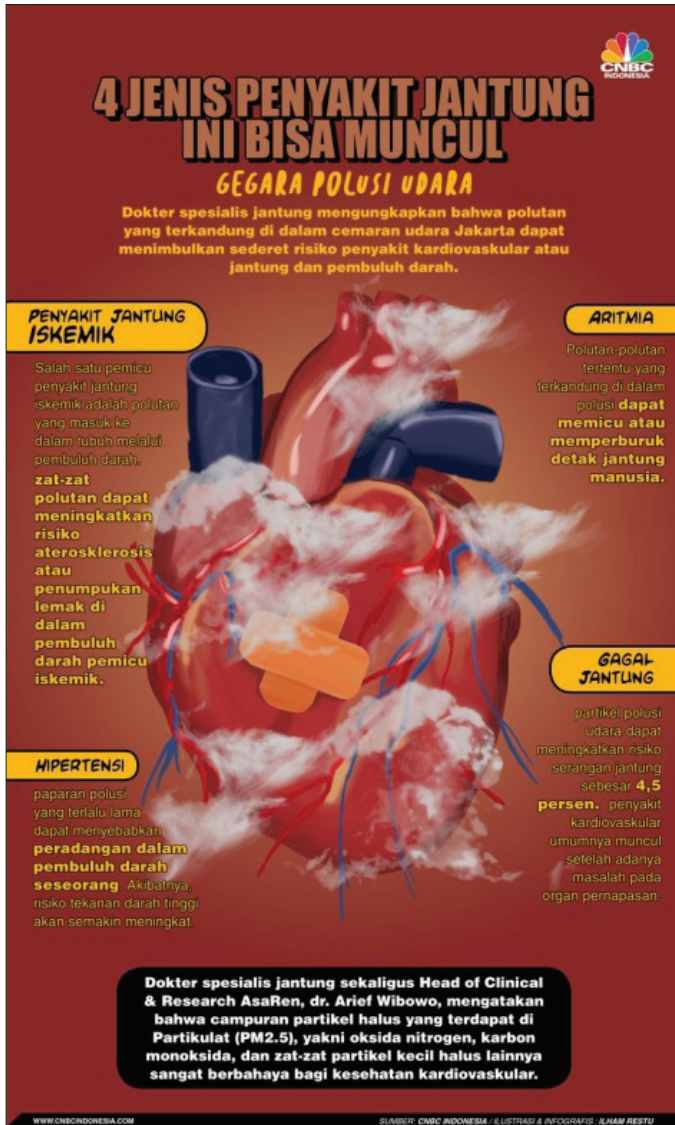
Dampak polusi udara dapat meningkatkan risiko terjadinya penyakit jantung, stroke, dan tekanan darah tinggi. Selain itu, polusi udara juga dapat memperburuk kondisi pasien yang sudah menderita penyakit kardiovaskular.

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; Sairaoka, 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 $\mu g/m^3$) 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 neuropsikiatri 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 ($\text{PM}_{2.5}$), 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).

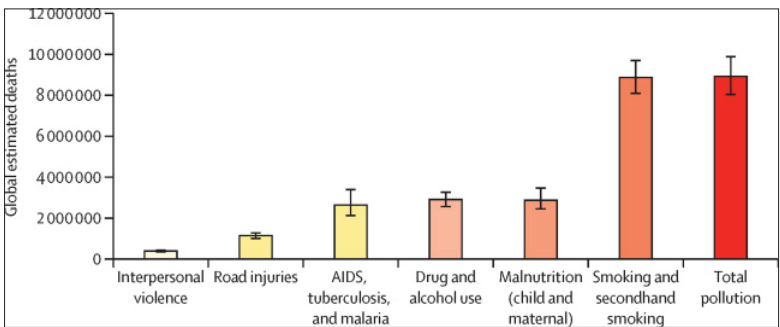
India memiliki tingkat polusi udara tertinggi di dunia, dengan New Delhi sebagai salah satu kota paling tercemar. Tingginya polusi udara di kota tersebut disebabkan oleh emisi kendaraan bermotor, industri, dan pembakaran bahan bakar fosil.

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 (Kusminingrum, 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), 1907–1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](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](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 negara polusi udara*. CNBC Indonesia. <https://www.cnbcindonesia.com/lifestyle/20230821104710-36-464587/4-jenis-penyakit-jantung-ini-bisa-muncul-negara-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](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(95)90173-6)
- Suirakoa, 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 (PM_{2.5} 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>
- .