



Paparan PM2.5 dan Risiko Penyakit Pernapasan pada Kelompok Rentan di Wilayah Urban: Systematic Review

Aisyah Luna Lampard¹, Meilinda Deliano Yasmine², Zarra Febrianti³, Citra Aulia Rahma⁴, Callysta Az Zahra⁵, Januar Ariyanto⁶, Yunita Amraeni⁷

¹⁻⁷Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta, 2410713009@mahasiswa.upnvj.ac.id

Info Artikel : Diterima Juni 2026 ; Disetujui Juli 2026 ; Publikasi Juli 2026

ABSTRAK

Polusi udara khususnya Particulate Matter 2.5 (PM2.5), merupakan masalah kesehatan lingkungan yang terus meningkat di wilayah urban dan berdampak terhadap kesehatan pernapasan. Menurut WHO pada 2019 polusi udara luar ruangan diperkirakan menyebabkan 4,2 juta kematian prematur di seluruh dunia. Kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan individu dengan penyakit komorbid memiliki risiko tinggi mengalami gangguan pernapasan akibat paparan PM2.5. Penelitian ini bertujuan mengkaji hubungan antara paparan PM2.5 dan risiko penyakit pernapasan pada kelompok rentan di wilayah urban. Metode penelitian menggunakan *Systematic Literature Review* (SLR) dengan kerangka PECO (*Population, Exposure, Comparison, Outcome*) dan Diagram PRISMA Flow. Pencarian artikel melalui basis data Google Scholar dan ScienceDirect dengan hasil awal 5.086 artikel, 732 dari Google Scholar dan 4.354 dari ScienceDirect. Setelah penyaringan berdasarkan rentang tahun publikasi 2021–2026, status *open access*, duplikasi, skrining, dan penilaian kelayakan, diperoleh 13 artikel yang memenuhi kriteria. Penilaian kualitas artikel menggunakan *Joanna Briggs Institute (JBI) Critical Appraisal Tool*. Hasil analisis menunjukkan sebagian besar artikel melaporkan hubungan positif antara paparan PM2.5 di wilayah urban dengan peningkatan risiko gangguan pernapasan pada kelompok rentan. Anak-anak menjadi kelompok paling rentan terhadap ISPA, asma, dan pneumonia. Pada lansia dan penderita komorbid, paparan jangka panjang mempercepat penurunan fungsi fisiologis dan memperburuk kondisi klinis. Pada masyarakat urban, risiko bersifat multifaktorial dipengaruhi faktor perilaku, sosial ekonomi, dan aktivitas luar ruangan. Disimpulkan bahwa paparan PM2.5 di wilayah urban berhubungan positif dengan peningkatan risiko gangguan kesehatan pernapasan pada kelompok rentan dengan kerentanan bervariasi sesuai karakteristik fisiologis dan faktor risiko penyetor.

Kata kunci: PM2.5, Penyakit Pernapasan, Kelompok Rentan, Wilayah Urban

ABSTRACT

Air pollution, particularly Particulate Matter 2.5 (PM2.5), is a growing environmental health problem in urban areas that negatively affects respiratory health. According to the WHO (2024), outdoor air pollution was estimated to have caused 4.2 million premature deaths worldwide in 2019. Vulnerable groups such as children, the elderly, and individuals with comorbidities are at high risk of developing respiratory disorders due to PM2.5 exposure. This study aims to examine the relationship between PM2.5 exposure and the risk of respiratory disease among vulnerable populations in urban areas. The method used is a *Systematic Literature Review* (SLR) based on the PECO framework (*Population, Exposure, Comparison, Outcome*) and the PRISMA Flow Diagram. Articles were searched through the Google Scholar and ScienceDirect databases, yielding an initial total of 5,086 articles, 732 from Google Scholar and 4,354 from ScienceDirect. After filtering based on publication year (2021–2026), open-access status, duplication removal, screening, and eligibility assessment, 13 articles met the inclusion criteria. The quality of the selected articles was assessed using the *Joanna Briggs Institute (JBI) Critical Appraisal Tool*. The results show that most articles reported a positive association between PM2.5 exposure in urban areas and an increased risk of respiratory disorders among vulnerable groups. Children were found to be the most vulnerable group to acute respiratory infections, asthma, and pneumonia. In the elderly and those with

comorbidities, long-term exposure accelerated physiological decline and worsened clinical conditions. Among the urban population, risk was multifactorial, influenced by behavioral, socioeconomic, and outdoor activity factors. It is concluded that PM2.5 exposure in urban areas is positively associated with increased respiratory health risks among vulnerable groups, with susceptibility varying according to physiological characteristics and accompanying risk factors.

Keywords: PM2.5, Respiratory Diseases, Vulnerable Groups, Urban Areas

PENDAHULUAN

Polusi udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang terus meningkat di wilayah urban dan telah berkembang menjadi isu global. Pada tahun 2019, polusi udara luar ruangan diperkirakan telah menyebabkan 4,2 juta kematian prematur di seluruh dunia (1) (WHO, 2024). Pertumbuhan penduduk, peningkatan aktivitas transportasi, industrialisasi, serta tingginya konsumsi energi di kawasan urban berkontribusi terhadap meningkatnya konsentrasi polusi udara ini (2). Kondisi ini berdampak langsung terhadap penurunan kualitas udara dan meningkatkan risiko gangguan kesehatan, terutama pada sistem pernapasan (3). Di Indonesia sendiri kualitas udara juga menjadi perhatian serius karena tingginya tingkat pencemaran udara di beberapa wilayah perkotaan. Pada tahun 2025 Indonesia menempati peringkat ke-17 sebagai negara dengan kualitas udara terburuk di dunia dengan Air Quality Index (AQI) mencapai 90 AQI+ US (4). Indeks AQI tersebut termasuk kategori Moderate sehingga paparan jangka panjang tetap dapat meningkatkan risiko penyakit kronis. Sedangkan secara global, pada tahun 2025 hanya 14% kota yang memenuhi pedoman tahunan PM2.5 yang ditetapkan oleh WHO yakni sebesar 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (5). Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar masyarakat perkotaan masih terpapar udara yang tidak sehat. Paparan polusi udara diketahui berkaitan dengan meningkatnya risiko gangguan kesehatan, terutama pada sistem pernafasan. Kondisi tersebut menjadi perhatian mengingat penyakit sistem pernafasan menyumbang sebesar 7,0% dari seluruh kematian di Uni Eropa pada tahun 2022 (6).

Salah satu komponen utamanya adalah particulate matter (PM), yaitu partikel padat atau cair yang tersuspensi di udara, seperti sulfat, nitrat, amonia, karbon hitam, dan debu mineral. Berdasarkan ukurannya, PM dibagi menjadi PM10, PM2.5, dan PM0.1. Di antara berbagai jenis PM, PM2.5 menjadi perhatian utama karena PM jenis ini memiliki ukuran yang sangat kecil ($\leq 2,5 \mu\text{m}$) sehingga dapat mencapai alveoli paru-paru dan dapat berdampak signifikan terhadap penurunan derajat kesehatan masyarakat terutama pada fungsi pernafasan (7). Dengan bahaya yang ditimbulkan, PM 2.5 justru banyak dijumpai di wilayah urban dengan penggunaan kendaraan bermotor menjadi sumber utama yang menyumbang sebesar 32-57% dari total emisi (8). Oleh sebab itu, wilayah urban yang padat lalu lintas memiliki paparan yang tinggi terhadap PM2.5 dan lebih berisiko terkena penyakit pernafasan.

Paparan PM2.5 diketahui berhubungan dengan berbagai gangguan pernapasan, mulai dari gejala ringan seperti batuk, penurunan fungsi paru-paru, asma, hingga penyakit serius seperti kanker paru-paru bahkan kematian (9). Paparan jangka panjang terhadap partikel halus (PM2.5) juga diketahui dapat meningkatkan risiko kematian prematur (10). Secara biologis, PM2.5 dapat mengakibatkan berbagai penyakit, hal ini dikarenakan PM2.5 merupakan partikel yang sangat kecil sehingga memungkinkan partikel tersebut menembus dan mengalami deposisi di saluran alveolar dan kapiler serta di setiap organ tubuh manusia melalui sistem peredaran (23). Paparan PM2.5 juga dapat menginduksi pembentukan *Reactive Oxygen Species* (ROS) dan secara signifikan dapat meningkatkan tingkat stres oksidatif yang memiliki peran penting dalam perkembangan asma (11). Selain itu, *Reactive Oxygen Species* (ROS) dapat merangsang sel mast untuk melepaskan histamin, prostaglandin D2, dan mediator proinflamasi lainnya, serta meningkatkan produksi lendir oleh sel epitel saluran napas yang mengakibatkan peradangan saluran napas (12). Selain berdampak pada sistem pernapasan, paparan partikulat juga berkontribusi terhadap penyakit kronis melalui mekanisme peradangan sistemik. Kondisi ini berkaitan dengan peningkatan risiko penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), penyakit jantung koroner, hipertensi, dan stroke (7). Hal ini menunjukkan bahwa paparan partikulat tidak hanya berdampak pada sistem pernapasan, tetapi juga dapat memicu gangguan kesehatan yang lebih luas dan bersifat sistemik.

Dampak polusi udara terutama PM2.5 paling besar dirasakan oleh kelompok rentan seperti anak-anak dan lansia karena karakteristik pernapasan mereka. Anak-anak lebih rentan terhadap polusi udara karena sistem pernapasan dan imunitas yang mereka masih berkembang, selain itu luas permukaan paru-paru mereka lebih besar per satuan berat badan, dan anak-anak juga lebih sering bernafas melalui mulut sehingga laju pernapasan dasar mereka lebih tinggi (13). Sedangkan Begitu pula pada kelompok lansia, mereka mengalami peningkatan risiko gangguan pernapasan akibat penurunan fungsi fisiologis seiring bertambahnya usia (14).

Selain berdampak pada penyakit pernapasan, PM2.5 juga dapat berdampak pada penyakit sistemik (15). Seperti contohnya lansia, mereka merupakan kelompok yang paling rentan karena memiliki prevalensi kardiovaskuler yang tinggi, melemahnya metabolisme, dan riwayat penyakit pernapasan (16). Saat PM2.5 masuk ke dalam tubuh, polutan tersebut dapat menembus ke dalam sistem peredaran darah,

sehingga memicu peradangan sistemik, stres oksidatif, gangguan koagulasi, hingga kerusakan endotel vaskular (17);(18);(19);(20). Begitu pula bagi individu dengan penyakit komorbid, paparan PM2.5 dapat memperburuk kondisi mereka karena sistem kekebalan tubuh mereka lebih lemah dibandingkan individu sehat (21).

Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa paparan PM2.5 berkaitan dengan peningkatan gangguan pernapasan. Namun, penelitian terdahulu umumnya berfokus pada satu kelompok populasi, seperti anak-anak (22);(23)(24) lansia (25); (26), atau individu dengan penyakit tertentu, serta menilai jenis paparan dan luaran kesehatan yang berbeda-beda. Akibatnya, belum tersedia sintesis yang secara sistematis membandingkan pola paparan, mekanisme kerentanan biologis, dan luaran pernapasan di antara berbagai kelompok rentan di wilayah urban. Selain itu, belum jelas apakah perbedaan usia, kondisi fisiologis, penyakit penyerta, dan karakteristik lingkungan perkotaan menghasilkan pola risiko yang berbeda pada setiap kelompok. Kajian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan mengintegrasikan dan membandingkan bukti mengenai paparan PM2.5 pada anak-anak, lansia, individu dengan komorbid, dan kelompok urban dengan paparan tinggi berdasarkan jenis paparan, mekanisme biologis, serta luaran pernapasan yang dilaporkan. Kebaruan kajian ini terletak pada sintesis komparatif antarkelompok rentan yang menghubungkan karakteristik host, jenis paparan

PM2.5, mekanisme biologis, dan variasi luaran pernapasan dalam konteks wilayah urban.

MATERI DAN METODE

Penelitian yang dilakukan menggunakan desain *systematic review* untuk menganalisis bagaimana hubungan paparan PM2.5 dengan risiko penyakit pernapasan pada kelompok rentan di wilayah perkotaan. Pelaporan kajian ini menggunakan alur diagram PRISMA Flow untuk menggambarkan proses identifikasi, penyaringan, dan penentuan kelayakan artikel yang dianalisis (27) protokol penelitian ini tidak didaftarkan pada registri *systematic review* seperti PROSPERO atau *Open Science Framework* (OSF). Kajian dilakukan pada Februari–April 2026, meliputi proses pencarian artikel yang dilakukan pada tanggal 10 April 2026, seleksi studi, ekstraksi data, dan sintesis hasil. Kerangka penelitian ini menggunakan kerangka PECO (Population, Exposure, Comparison, Outcome) karena lebih sesuai untuk mengkaji hubungan antara paparan lingkungan (PM2.5) terhadap suatu outcome kesehatan yang bersifat non-intervensional. Karena penelitian ini tidak melibatkan pemberian intervensi, tetapi mengkaji dampak paparan yang terjadi, penggunaan komponen "Exposure" pada PECO dianggap lebih relevan dibandingkan komponen "Intervention" pada PICOS. Kerangka ini menjadi dasar dalam menentukan kriteria inklusi dan eksklusi studi yang dianalisis, ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. PECO

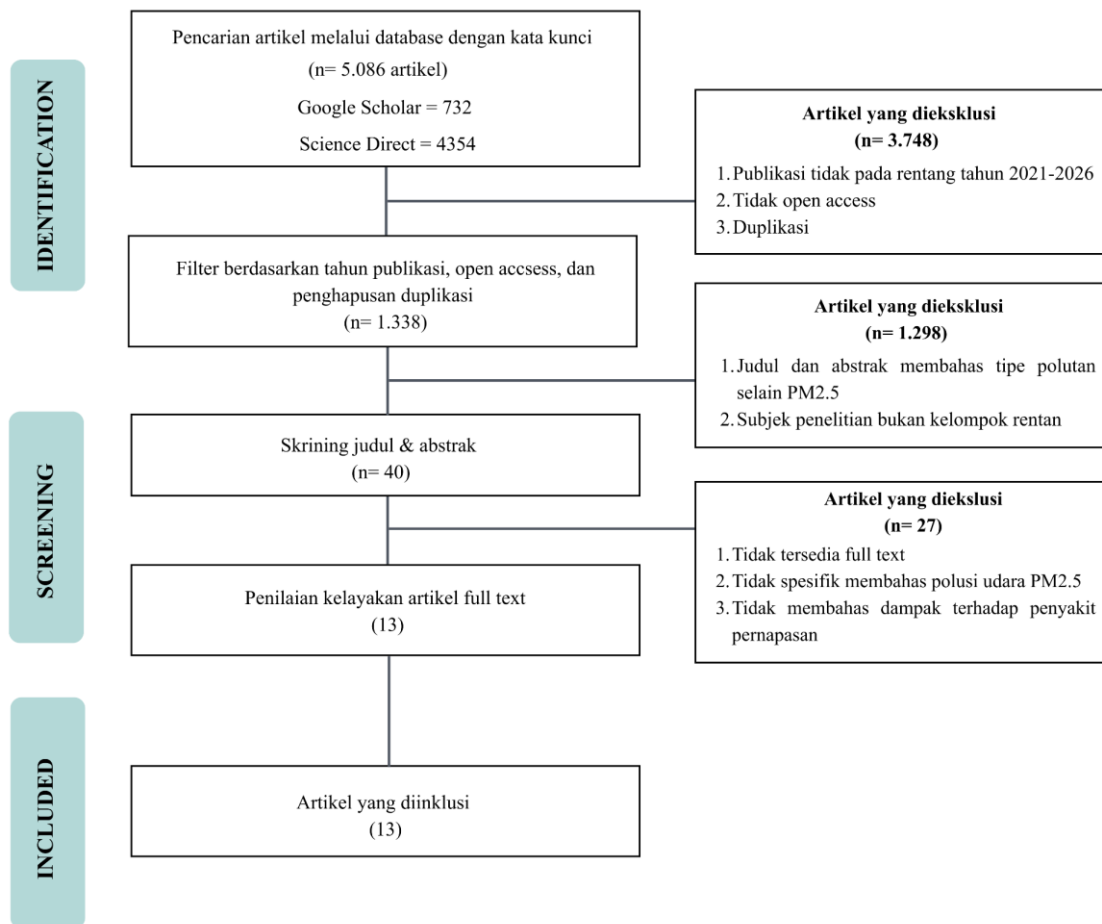
Komponen Peco	Isi
P: Population	Kelompok rentan yang tinggal di wilayah urban/perkotaan yang berpotensi terpapar polusi udara, seperti anak-anak, lansia, atau individu dengan kondisi kesehatan tertentu yang lebih sensitif terhadap dampak polusi udara.
E: Exposure	Faktor yang diteliti adalah Paparan polutan udara berupa Particulate Matter 2.5 (PM2.5) di wilayah perkotaan.
C: Comparison	Kelompok rentan yang tinggal di wilayah dengan tingkat paparan PM2.5 yang lebih rendah.
O: Outcomes	Hasil yang diukur adalah kejadian penyakit pernapasan meliputi Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA), pneumonia, asma, Penyakit Paru Obstruktif Kronis (PPOK), penurunan fungsi paru, mortalitas terkait pernapasan, dan gangguan pernapasan lainnya.

Dalam penelitian ini, pencarian artikel dilakukan melalui database Google Scholar dan ScienceDirect dengan menggunakan operator Boolean (AND) untuk menggabungkan kata kunci pencarian. Pada Google Scholar kata kunci yang digunakan adalah "PM2.5" AND "kelompok rentan" AND "risiko kesehatan", sedangkan pada ScienceDirect digunakan kata kunci "PM2.5" AND "vulnerable groups" AND "health risk". Kriteria

inklusi meliputi artikel yang dipublikasikan dalam lima tahun terakhir, tersedia dalam bentuk full text, dapat diakses secara terbuka, berbahasa Indonesia atau Inggris, membahas paparan PM2.5, penyakit pernapasan, dan kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, atau individu dengan komorbid. Adapun artikel dikeluarkan apabila memenuhi fokus penelitian, tidak membahas PM2.5 secara spesifik, tidak memuat outcome kesehatan pernapasan, tidak

tersedia dalam bentuk full text, tidak open access, dipublikasikan di luar rentang waktu yang ditentukan atau merupakan artikel duplikat. Proses penghapusan artikel duplikat dilakukan menggunakan aplikasi manajemen referensi *Mendeley*. Proses seleksi artikel dilakukan oleh dua

peninjau secara independen. Apabila terdapat perbedaan hasil dalam seleksi antara kedua peninjau, penyelesaian dilakukan melalui diskusi bersama dengan penulis lain sampai tercapai kesepakatan.



Gambar 1. PRISMA Flow

Berdasarkan proses seleksi artikel menggunakan alur PRISMA (Gambar 1), diperoleh sejumlah artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan dianalisis dalam systematic review ini. Hasil awal yang diperoleh yaitu 5.086 artikel, terdiri atas 4.354 artikel dari ScienceDirect dan 732 artikel dari Google Scholar. Pada tahap identifikasi, sebanyak 3.748 artikel dieksklusi, terdiri atas 3.746 artikel yang tidak sesuai rentang tahun publikasi (2021–2026) dan tidak tersedia secara open access, serta 2 artikel yang teridentifikasi sebagai duplikat, sehingga diperoleh 1.338 artikel untuk tahap skrining. Skrining judul dan abstrak dilakukan secara bersamaan sehingga menghasilkan 40 artikel yang lolos untuk dinilai kelayakannya secara full text, sedangkan 1.298 artikel lainnya dieksklusi karena membahas tipe polutan selain PM2.5 atau subjek penelitian bukan kelompok rentan. Pada tahap penilaian kelayakan full text, sebanyak 27 artikel dieksklusi karena tidak tersedia dalam bentuk full text, tidak secara khusus membahas polusi udara

PM2.5, atau tidak membahas pengaruhnya terhadap gangguan pernapasan, sehingga diperoleh 13 artikel yang memenuhi kriteria untuk dianalisis dalam systematic review yang berasal dari berbagai negara dengan desain penelitian yang bervariasi, terutama cross-sectional, observasional, cohort, dan mixed-methods. Artikel yang memenuhi kriteria inklusi akan dinilai kualitas metodologisnya menggunakan Joanna Briggs Institute Critical Appraisal Tools sesuai dengan desain studi masing-masing. JBI Critical Appraisal Tools digunakan untuk menilai tingkat kepercayaan, relevansi, dan kualitas hasil penelitian yang dimasukkan dalam systematic review. Hasil penilaian menunjukkan bahwa 11 dari 13 artikel berkategori kualitas tinggi, terdiri atas tujuh artikel dengan desain cross-sectional yaitu Patrick et al. (2026), Pradhan et al. (2024), Shuangyu Wei et al. (2026), Alimin & Wahyuni (2021), Agustan et al. (2024), Pakpahan, E. L. E., & Enni Halimatussadiyah Pakpahan E. H. (2025), dan deSouza et al. (2022); satu artikel case-control yaitu

Cisneros et al. (2025); satu artikel cohort yaitu Lei Wan et al. (2025); satu artikel meta-analisis yaitu Ruijing Ni et al. (2024); serta satu artikel kuasi-eksperimental yaitu Dong Im Kim et al. (2025). Satu artikel dengan desain cross-sectional, yaitu Pertiwi et al. (2024), berkategori kualitas sedang, sedangkan satu artikel dengan desain studi literatur, yaitu Wahyu Setiaji (2025), berkategori kualitas rendah. Hasil penilaian kualitas metodologis menunjukkan bahwa sebagian besar studi memenuhi mayoritas kriteria appraisal sesuai dengan desain penelitian masing-masing. Kekuatan utama studi-studi ini meliputi kejelasan populasi penelitian, penggunaan metode pengukuran paparan PM2.5, dan kesesuaian analisis statistik, sedangkan beberapa kelemahan ditemukan mencakup pengendalian faktor perancu, validitas pengukuran paparan personal, serta kelengkapan pelaporan metode. Seluruh studi tetap dimasukkan dalam sintesis, dengan beberapa studi diinterpretasikan secara lebih hati-hati. . Sintesis hasil dalam kajian ini menggunakan pendekatan *narrative synthesis*, yaitu dengan menggabungkan dan mengorganisasikan temuan dari studi-studi dengan berbagai desain dan populasinya secara tekstual, kemudian dikelompokkan sesuai kategori kelompok rentan. Secara umum, artikel yang dianalisis membahas hubungan polusi udara PM2.5 terhadap kelompok rentan mulai dari anak-anak,

lansia, masyarakat umum perkotaan hingga Individu dengan komorbid atau kelompok berisiko tinggi. Outcome yang paling sering dikaji adalah penyakit pernafasan seperti ISPA, asma dan penurunan fungsi paru yang diukur menggunakan instrumen kuesioner/wawancara kesehatan, pengukuran kualitas udara PM2.5, data rekam medis/kunjungan rumah sakit, pemeriksaan fungsi paru, data sekunder populasi dan survei kesehatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebanyak 13 artikel yang terpilih dalam analisis Systematic Review ditampilkan pada Tabel 2 yang mencantumkan penulis, tahun, negara/wilayah, desain studi, populasi/kelompok rentan, sumber/pengukuran paparan PM2.5, Outcome pernafasan yang dikaji serta temuan utama dalam penelitian. Secara umum, mayoritas penelitian berasal dari Indonesia, diikuti oleh Amerika Serikat, serta masing-masing satu artikel dari Sub-Sahara Afrika, Fiji, Inggris, China, dan Korea Selatan. Desain penelitian yang paling dominan digunakan adalah studi observasional, termasuk pendekatan cross-sectional. Anak-anak dan balita menjadi kelompok yang paling banyak diteliti, diikuti oleh masyarakat perkotaan umum, individu dengan komorbid atau berisiko tinggi, serta lansia

Tabel 2. Karakteristik Studi

No	Penulis, Tahun	Negara/ Wilayah	Desain Studi	Populasi/ Kelompok Rentan	Sumber/ Pengukuran Paparan PM2.5	Outcome Pernafasan yang Dikaji	Temuan Utama
1	Patrick et al. (2026)	Sub-Saharan Africa.	Studi observasional spasial <i>Bayesian</i>	Anak-anak < 5 tahun	Data Survei Demografi dan Kesehatan (DHS) dan data satelit PM 2.5 milik NASA.	ISPA	Paparan polusi PM2,5 selama periode pascanatal secara signifikan dapat meningkatkan risiko ISPA sebesar 22%.
2	Wahyu Setiaji. (2025)	Indonesia.	Studi literatur dengan menganalisis artikel ilmiah primer.	Balita di wilayah perkotaan	Data sekunder dari artikel ilmiah primer	Pneumonia	Particulate Matter 2.5 (PM2.5) dapat meningkatkan risiko pneumonia pada balita karena ukuran PM2.5 yang sangat kecil, sehingga dapat menembus paru-paru hingga ke alveoli yang dapat memicu inflamasi.
3	Pradhan et al. (2024)	Fiji	Studi observasional (<i>personal exposure study</i>)	Anak berusia 10 hingga 15 tahun	KOALA monitor dilengkapi dengan time-activity diary dan kuesioner.	Tidak mengkaji outcome pernapasan secara langsung	Paparan PM2.5 terhadap anak berpotensi meningkatkan risiko kesehatan berdasarkan variasi aktivitas, lingkungan

No	Penulis, Tahun	Negara/ Wilayah	Desain Studi	Populasi/ Kelompok Rentan	Sumber/ Pengukuran Paparan PM2.5	Outcome Pernafasan yang Dikaji	Temuan Utama
							mikro, sumber dalam ruangan serta paparan personal yang tinggi.
4	Shuangyu Wei et al. (2026)	Inggris	Studi observasional	Anak berusia 8 hingga 11 tahun	Pemantauan stasioner dan pemantauan pribadi individu.	Asma dan infeksi saluran pernapasan	Lingkungan rumah memberikan kontribusi terbesar terhadap dosis PM2.5 yang dihirup anak-anak akibat aktivitas pemanasan, ventilasi, dan paparan asap rokok orang dewasa.
5	Alimin, S. A., & Wahyuni, N. (2021)	Indonesia	Studi observasional (<i>cross-sectional</i>)	Anak-anak usia sekolah dasar	Pengukuran kualitas udara dalam ruangan sekolah	Asma, mengini bronkitis, ISPA bawah, batuk, sesak napas, dan penurunan fungsi paru.	Kualitas udara dalam ruangan di tiga sekolah tidak memenuhi standar; PM2.5 dan PM10 melebihi batas dan berisiko menyebabkan gangguan pernapasan pada siswa, seperti asma, mengi, bronkitis, ISPA bawah, batuk, sesak napas, dan penurunan fungsi paru.
6	Ruijing Ni et al.(2024)	Multi-country	Meta-analisis global	Anak-anak dan dewasa dari berbagai negara	Data paparan PM2.5 dari studi kohort , <i>case-control</i> , <i>cross-sectional</i> di 22 negara	Asma	Paparan jangka panjang PM2.5 meningkatkan risiko dan beban asma pada anak dan dewasa terutama di negara berpolusi tinggi seperti india dan tiongkok.
7	Lei Wan et al. (2025)	China	Studi pemodelan menggunakan <i>Fusion relative risk model</i>	Lansia	Data paparan PM2.5 tahun 2010–2060	Penyakit Paru Obstruktif Kronis (PPOK) dan infeksi saluran pernapasan bawah (LRTI)	Kematian akibat PM2.5 diproyeksikan meningkat pada skenario baseline, terutama pada kelompok lansia yang menjadi kelompok paling rentan.
8	Agustan et al. (2024)	Indonesia	Studi observasional analitik	Masyarakat berusia produktif 15-64 tahun	Pengukuran kualitas udara ambien PM2,5 dan PM10 menggunakan perangkat HVAS, serta wawancara kuesioner.	ISPA	Konsentrasi PM2.5 dan PM10 di Desa Tanjung Jambu tidak berhubungan signifikan terhadap kejadian ISPA, melainkan kebiasaan merokok yang ditemukan berhubungan signifikan terhadap kejadian ISPA.

No	Penulis, Tahun	Negara/ Wilayah	Desain Studi	Populasi/ Kelompok Rentan	Sumber/ Pengukuran Paparan PM2.5	Outcome Pernafasan yang Dikaji	Temuan Utama
9	Pakpahan, E. L. E., & Enni Halimatussadiyah Pakpahan E. H. (2025)	Indonesia	Studi kuantitatif dengan desain observasional analitik (cross-sectional)	Masyarakat perkotaan umum (berisiko tinggi terpapar PM2.5)	Data stasiun pemantauan kualitas udara milik instansi terkait yang mencatat konsentrasi PM2,5 secara berkala di Kota Medan. Dan data sekunder dari faskes.	Gangguan pernafasan (Asma, PPOK, iritasi saluran pernapasan)	Terdapat hubungan signifikan antara paparan PM2,5 dengan gangguan kesehatan. Sebanyak 43,5% responden terpapar tinggi, 39,5% mengalami gangguan pernapasan, dan 34,0% gangguan kardiovaskular.
10	Pertiwi et al. (2024)	Indonesia	Studi Observasional analitik	Masyarakat perkotaan umum (pekerja lapangan)	Pengukuran langsung di lapangan melalui sampling udara di 24 titik lokasi penelitian.	Asma dan kanker paru-paru	Konsentrasi PM10 dan PM2.5 tinggi terutama pada jam sibuk dan nilai $RQ \geq 1$ pada semua titik, yang berarti risiko kesehatan tidak aman. Nilai intake rata-rata sebesar 7,18 mg/kg/hari (PM10) dan 5,29 mg/kg/hari (PM2.5),
11	deSouza et al. (2022)	Amerika Serikat	Desain Studi Ekologi Cross-Sectional (Potong Lintang Ekologis) dengan Analisis Multilevel.	Kelompok berisiko tinggi (lansia, kulit hitam, kelompok miskin, penduduk berpendidikan rendah, kelahiran luar negeri, dan masyarakat perkotaan).	Model prediksi berbasis satelit pada resolusi grid 1 km $\times$ 1 km	Mortalitas terkait paparan PM2.5	Paparan PM2.5 berhubungan signifikan dengan peningkatan kematian, terutama pada lansia dan kelompok status sosial ekonomi rendah.
12	Dong Im Kim et al. (2025)	Korea Selatan	Studi Eksperimental In Vivo (Animal Experimental Study) dengan Rancangan Acak Kelompok Kontrol.	Individu dengan riwayat cedera paru-paru akibat bahan kimia.	Paparan PM2.5 dibuat secara artifisial menggunakan Generator jelaga miniCAST 5201C berbahan bakar gas propana (C_3H_8) dengan laju alir 0,06 LPM, Gas pendukung: udara (7,3 LPM) dan N_2 (21,36 LPM)	Peradangan paru, hiperplasia bronkioloalveolar, dan fibrosis paru-paru	Riwayat cedera paru akibat bahan kimia secara signifikan meningkatkan kerentanan terhadap paparan inhalasi PM2.5, yang menyebabkan peradangan paru-paru yang memburuk, hiperplasia bronkioloalveolar, dan fibrosis paru-paru.
13	Cisneros et al. (2025)	Amerika Serikat (Fresno).	Studi observasional dengan desain <i>time-stratified case-crossover</i>	kelompok berisiko tinggi	Data dari 5 stasiun pemantauan kualitas udara milik US EPA	Asma	Paparan PM2.5 berhubungan dengan peningkatan kunjungan (IGD) akibat asma, terutama

No	Penulis, Tahun	Negara/ Wilayah	Desain Studi	Populasi/ Kelompok Rentan	Sumber/ Pengukuran Paparan PM2.5	Outcome Pernafasan yang Dikaji	Temuan Utama
					(Air Quality System/AQS) di Fresno, California.		pada kelompok rentan seperti anak usia 2–5 tahun dan individu dengan riwayat penyakit pernapasan. penelitian menunjukkan bahwa PM2.5 dapat memperparah kondisi asma dan meningkatkan risiko eksaserbasi gangguan pernapasan.

Hasil sintesis yang mencakup jenis paparan, mekanisme biologis, dan outcome pernapasan pada setiap kelompok rentan, dijelaskan secara rinci

dalam Tabel 3 sebagai upaya untuk mengintegrasikan temuan-temuan secara sistematis.

Tabel 3. Sintesis Dampak PM2.5 Berdasarkan Kelompok Rentan

No	Kelompok Rentan	Artikel Pendukung	Jenis Paparan PM2.5	Mekanisme Paparan terhadap Kelompok Rentan	Outcome Pernafasan	Arah Hubungan
1	Anak-anak	Patrick et al. (2026); Wahyu Setiaji. (2025); Pradhan et al. (2024); Shuangyu Wei et al. (2026); Alimin, S. A., & Wahyuni, N. (2021); Ruijing Ni et al.(2024)	Outdoor/Ambient exposure, personal exposure, indoor exposure, indirect exposure	Menghirup PM2,5 ke dalam alveoli paru-paru menyebabkan kerusakan saluran pernapasan, masalah sistem kekebalan tubuh, dan peradangan. Karena sistem pernapasan anak-anak yang belum matang dan fakta bahwa udara di dalam ruangan, sekolah, rumah, dan wilayah dengan tingkat polusi tinggi adalah sumber utama paparan bagi anak-anak	Meningkatkan risiko kesehatan anak termasuk, ISPA, pneumonia, meningitis ISPA bawah, batuk, sesak napas, dan penurunan fungsi paru	Mayoritas menunjukkan hubungan positif
2	Lansia	Lei Wan et al. (2025); DeSouza et al. (2022)	Ambient exposure	Paparan jangka panjang penduduk lansia terhadap PM2.5 lingkungan (udara luar ruangan). Seiring bertambahnya usia, sistem tubuh dan fungsi paru-paru mereka menurun, membuat mereka lebih rentan terhadap efek negatif polusi udara	Penyakit Paru Obstruktif Kronis (PPOK), infeksi saluran pernapasan bawah (LRTI) dan mortalitas terkait paparan PM2.5	Menunjukkan hubungan positif searah

				serta risiko kematian pada lansia dan kelompok sosial ekonomi rendah yang lebih rentan terhadap polusi udara.		
3	Individu dengan komorbid atau kelompok berisiko tinggi	Dong Im Kim et al. (2025); Cisneros et al. (2025);	Experimental enhalation exposure dan ambient exposure	Paparan PM2,5 memperburuk asma dan penyakit paru-paru dengan meningkatkan peradangan dan kerusakan paru-paru, terutama pada anak muda dan mereka yang memiliki riwayat cedera paru-paru.	Peradangan paru, hiperplasia bronchioloalveolar, fibrosis paru-paru, dan asma.	Menunjukkan hubungan positif searah
4	Masyarakat perkotaan umum	Agustan et al. (2024); Pakpahan, E. L. E., & Enni Halimatussadiya h Pakpahan E. H. (2025); Pertiwi et al. (2024)	Ambient exposure	Menghirup partikel halus yang menembus sistem pernapasan meningkatkan risiko penyakit pernapasan paru dan kesehatan, terutama pada populasi perkotaan dan pekerja luar ruangan dengan paparan berkepanjangan terhadap PM2.5 dari udara sekitar dan lingkungan perkotaan.	ISPA, Asma, Mayoritas iritasi saluran pernapasan dan kanker paru-paru	menunjukkan hubungan positif

Karakteristik Studi

Berdasarkan 13 artikel yang dianalisis, sebagian besar penelitian menggunakan observasional analitik dengan pendekatan cross-sectional. Penelitian ini dominan karena paparan PM2.5 tidak dapat dimanipulasi secara etis pada manusia, sehingga pengamatan langsung di lapangan menjadi pilihan yang tepat. Selain cross-sectional, terdapat pula studi kohort, studi pemodelan jangka panjang, studi eksperimental in vivo, meta-analisis global, dan studi literatur, yang mencerminkan keberagaman pendekatan dalam mengkaji hubungan antara PM2.5 dan gangguan pernapasan, baik pada tingkat individu, populasi, maupun proyeksi risiko kesehatan jangka panjang.

Metode pengukuran paparan PM2.5 yang digunakan juga bervariasi, mulai dari pemantauan personal menggunakan perangkat portabel, pengukuran langsung di lapangan, data stasiun pemantauan resmi pemerintah, hingga estimasi berbasis data satelit. Perbedaan metode ini perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil karena masing-masing memiliki tingkat akurasi dan cakupan wilayah yang berbeda.

Subjek penelitian mencakup balita dan anak-anak (6 artikel), masyarakat perkotaan umum (3 artikel), individu dengan komorbid atau berisiko

tinggi (2 artikel), dan lansia (2 artikel), yang berasal dari berbagai negara meliputi Indonesia, Amerika Serikat, China, Inggris, Fiji, Korea Selatan, Afrika Sub-Sahara, dan satu meta-analisis multi-negara.

Outcome pernapasan yang paling sering dilaporkan meliputi ISPA, asma, pneumonia, PPOK, infeksi saluran bawah, iritasi saluran pernapasan, eksaserbasi asma, penurunan fungsi paru, hingga mortalitas terkait paparan PM2.5. Berdasarkan penilaian kualitas menggunakan JBI Critical Appraisal Tools, sebagian besar artikel berkategori kualitas tinggi, dengan satu artikel berkategori sedang dan satu artikel berkategori rendah.

Hubungan Paparan PM2.5 dengan Gangguan Pernapasan

Secara biologis, paparan PM2.5 dapat menimbulkan gangguan pernapasan melalui beberapa tahapan mekanisme. Ukuran partikel yang sangat kecil ($\leq 2,5$ mikron) memungkinkan PM2.5 mengalami deposisi hingga ke saluran napas bawah dan alveolus, area yang seharusnya berperan dalam pertukaran gas (28). Deposisi ini memicu respons inflamasi lokal, ditandai dengan peningkatan produksi Reactive Oxygen Species (ROS) yang melebihi kapasitas antioksidan sel sehingga terjadi

stres oksidatif. Kondisi ini merangsang pelepasan sitokin proinflamasi seperti IL-6 dan TNF- α , yang pada akhirnya menyebabkan kerusakan epitel saluran napas, gangguan fungsi silia, serta penurunan kapasitas pertukaran gas di alveolus (29). Mekanisme inilah yang mendasari peningkatan risiko berbagai gangguan pernapasan akibat paparan PM_{2.5}, mulai dari iritasi ringan hingga perburukan penyakit pernapasan kronis.

Dalam perspektif epidemiologi pada teori segitiga epidemiologi oleh Dr. John Gordon (dalam Haryono dkk, 2021) menjelaskan bahwa PM_{2.5} dapat dipahami sebagai agent lingkungan yang berinteraksi dengan host dan environment dalam menimbulkan gangguan kesehatan (30). Host mencakup karakteristik individu seperti usia, status kesehatan, imunitas, dan riwayat penyakit, sedangkan environment mencakup kondisi perkotaan seperti kepadatan lalu lintas, aktivitas industri, kualitas hunian, dan ventilasi ruangan. Ketidakseimbangan antara ketiga komponen ini menentukan besarnya risiko gangguan pernapasan pada suatu kelompok. Karakteristik host pada kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, orang dengan penyakit komorbid, dan masyarakat umum di wilayah urban menjadi dasar pembahasan berikut.

Paparan PM_{2.5} pada Anak-anak

Anak-anak merupakan kelompok dengan kerentanan tertinggi terhadap paparan PM_{2.5}, bukan hanya karena sistem pernapasan yang masih berkembang, tetapi juga karena karakteristik fisiologis spesifik yang meningkatkan dosis paparan per satuan berat badan. Rasio luas permukaan paru-paru terhadap berat badan pada anak lebih besar dibandingkan orang dewasa, sementara laju pernapasan anak per kilogram berat badan juga lebih tinggi, sehingga volume udara dan volume polutan yang terhirup relatif lebih besar (31). Kondisi ini diperberat oleh sistem imun yang belum matang serta struktur saluran napas yang lebih berpori, sehingga proses deposisi dan inflamasi akibat PM_{2.5} berlangsung lebih intensif pada anak. Sejalan dengan hal tersebut, Setiaji (2025) menemukan bahwa paparan PM_{2.5} pada balita dan anak-anak memicu inflamasi serta kerusakan membran mukosa saluran napas, yang bermanifestasi sebagai peningkatan kejadian ISPA, pneumonia, asma, bronkitis, batuk, dan penurunan fungsi paru (23).

Merujuk pada WHO Air Quality Guideline, ambang batas paparan PM_{2.5} yang direkomendasikan adalah 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (rata-rata tahunan) dan 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (rata-rata 24 jam) untuk melindungi kelompok rentan termasuk anak-anak (32). Namun temuan Alimin & Wahyuni (2021) menunjukkan konsentrasi PM_{2.5} dan PM₁₀ di ruang kelas tiga sekolah telah melampaui ambang aman ($\text{HQ} > 1$) (18) mengindikasikan bahwa paparan yang diterima anak di lingkungan sekolah pun berpotensi berada di atas standar WHO tersebut, sehingga

risiko kesehatan pernapasan pada anak bersifat nyata, bukan hanya potensial.

Bila dibaca melalui kerangka segitiga epidemiologi Gordon, tingginya kerentanan anak terhadap PM_{2.5} merupakan hasil interaksi antara host dan environment, bukan hanya besarnya paparan agent. Imunitas yang belum matang dan laju ventilasi tinggi per kilogram berat badan membuat dosis efektif PM_{2.5} yang diterima anak lebih besar pada konsentrasi agent yang sama, dan kerentanan ini diperbesar oleh environment mikro tempat anak beraktivitas seperti ruang kelas dan rumah dengan ventilasi buruk. Dengan demikian, perlindungan anak perlu menyasar environment mikro tersebut, meliputi perbaikan kualitas udara sekolah dan rumah, pengurangan paparan asap rokok, serta edukasi orang tua dan pihak sekolah.

Paparan PM_{2.5} pada Lansia

Kelompok lansia memiliki kerentanan tinggi terhadap paparan PM_{2.5} yang berakar pada perubahan fisiologis akibat penuaan. Proses penuaan menyebabkan degradasi elastin pada jaringan paru sehingga elastisitas paru menurun, sementara kapasitas antioksidan seluler juga menurun sehingga ROS yang dihasilkan dari paparan PM_{2.5} tidak dapat dinetralisir secara optimal dan menyebabkan kerusakan jaringan yang lebih besar. Selain itu, terjadi immunosenescence atau penurunan fungsi sistem imun yang membuat lansia lebih rentan mengalami infeksi saluran napas akibat paparan polutan (33);(34). Kombinasi faktor biologis ini menjelaskan mengapa paparan PM_{2.5} pada lansia dapat memperburuk fungsi pernapasan, meningkatkan risiko infeksi saluran napas bawah, mempercepat perburukan PPOK, hingga meningkatkan risiko kematian.

Dua studi besar menunjukkan pola temuan yang konsisten meski dari sudut pandang berbeda. Lei Wan et al. (2025) memproyeksikan peningkatan kematian akibat PM_{2.5} pada lansia apabila pencemaran udara tidak dikendalikan, dengan PPOK dan infeksi saluran napas bawah (LRTI) sebagai penyebab utama (26), sementara DeSouza et al. (2022) menemukan bahwa dampak PM_{2.5} lebih besar pada kelompok usia lebih tua dan status sosial ekonomi rendah (10). Hal ini diperkuat oleh Han Eol Cho (2023) yang menunjukkan penurunan fungsi paru signifikan mulai usia di atas 35 tahun, yang kemudian berinteraksi dengan faktor risiko seperti kebiasaan merokok dan paparan polusi untuk meningkatkan risiko PPOK (35).

Dimensi yang disampaikan Desouza juga sejalan dengan konsep Environmental Justice, dimana kelompok dengan status sosial ekonomi rendah, cenderung tinggal di kawasan berkualitas udara buruk sekaligus memiliki akses lebih terbatas terhadap layanan kesehatan dan sarana mitigasi, sehingga beban paparan PM_{2.5} terkonsentrasi pada kelompok yang paling minim kapasitas melindungi

diri seperti lansia (Sumber: Environmental and Energy Study Institute (EESI) (36).

Kesesuaian temuan Lei Wan et al. (2025) dan DeSouza et al. (2022) dapat dijelaskan melalui segitiga epidemiologi Gordon: Lei Wan menyoroti pelemahan host akibat penurunan fungsi fisiologis dan imunosenesensi, sementara DeSouza menyoroti environment berupa keterbatasan sosial ekonomi yang membatasi kapasitas mitigasi. Kedua dimensi ini tidak berdiri terpisah, melainkan saling memperkuat pada agent yang sama. Oleh karena itu, perlindungan bagi lansia perlu mencakup pengendalian kualitas udara lingkungan, penggunaan alat pelindung diri, pemantauan kesehatan berkala, serta kesetaraan akses mitigasi bagi lansia dengan status sosial ekonomi rendah.

Paparan PM2.5 pada Individu dengan Penyakit Komorbid

Individu dengan penyakit penyerta memiliki kerentanan lebih tinggi terhadap PM2.5 karena kapasitas kompensasi jaringan paru mereka sudah berkurang. Pada kelompok ini, deposisi PM2.5 di alveolus memicu ROS berlebih yang mengaktifkan jalur NF- κ B, mendorong pelepasan sitokin proinflamasi (IL-6, TNF- α) dalam jumlah lebih besar karena jaringan yang sudah rusak seperti akibat fibrosis atau asma memiliki respons inflamasi basal lebih tinggi. Peningkatan sitokin ini memperparah kerusakan epitel dan menghambat regenerasi jaringan, sehingga pemulihan lebih lambat (Kotlyarov & Oskin, 2025). Sejalan dengan hal ini, Dong Im Kim (2025) menemukan bahwa individu dengan riwayat cedera paru akibat bahan kimia mengalami peningkatan peradangan paru, hiperplasia bronchioloalveolar, dan fibrosis paru setelah terpapar PM2.5 (37).

Dua studi lain menunjukkan dampak PM2.5 pada komorbid dari level yang berbeda namun saling melengkapi. Cisneros et al. (2025) menyoroti dampak pada level klinis-fisiologis, yaitu perburukan asma dan peningkatan eksaserbasi pernapasan (38), sementara Hassan dkk. (2025) menyoroti dampak pada level sistem layanan kesehatan, berupa peningkatan kunjungan rumah sakit pada pasien dengan berbagai penyakit penyerta (39). Kedua studi ini secara bersama-sama menunjukkan bahwa dampak PM2.5 pada kelompok komorbid tidak berhenti pada perburukan kondisi fisiologis individu, tetapi berimplikasi lebih luas pada peningkatan beban sistem kesehatan.

Dalam kerangka Gordon, kelompok komorbid menunjukkan bagaimana kondisi host yang terganggu menurunkan ambang toleransi terhadap agent yang sama: konsentrasi PM2.5 yang hanya memicu iritasi ringan pada individu sehat dapat memicu respons inflamasi jauh lebih besar pada host dengan riwayat fibrosis atau asma, seperti ditemukan Dong Im Kim (2025) dan Cisneros et al. (2025). Oleh karena itu, kelompok dengan komorbid

memerlukan pemantauan kualitas udara, edukasi pasien penyakit kronis, penguatan sistem peringatan dini kualitas udara, serta anjuran pembatasan aktivitas luar ruangan saat konsentrasi PM2.5 meningkat.

Paparan PM2.5 pada Masyarakat Umum Wilayah Urban

Di luar kelompok rentan spesifik yang telah dibahas, masyarakat urban secara umum turut menghadapi risiko signifikan, dengan pola dosis-respons yang konsisten: semakin tinggi konsentrasi PM2.5 dan semakin lama durasi paparan, semakin besar risiko gangguan pernapasan yang muncul. Pola ini tampak dari hubungan signifikan antara paparan PM2.5 dan gangguan pernapasan pada masyarakat perkotaan (7), yang risikonya meningkat tajam pada kelompok dengan paparan durasi panjang seperti pekerja lapangan, pedagang, dan pengemudi (9), serta pada kelompok yang tinggal dekat sumber emisi seperti jalan raya dan kawasan industri (40).

Pola kerentanan pada masyarakat umum juga tidak lepas dari faktor sosial ekonomi: DeSouza et al. (2022) menemukan bahwa masyarakat perkotaan dengan status sosial ekonomi dan pendidikan rendah memiliki risiko kematian lebih tinggi akibat PM2.5 (10). Pola ini sejalan dengan kerangka Social Determinants of Health (SDOH), pendidikan rendah berkaitan dengan literasi kesehatan yang terbatas dan pekerjaan yang lebih banyak melibatkan aktivitas luar ruangan, sehingga intensitas paparan meningkat sekaligus akses layanan kesehatan preventif berkurang (41). Pola pada masyarakat umum urban menegaskan bahwa ketiga komponen segitiga Gordon bekerja simultan pada level populasi: agent berupa PM2.5 dari kendaraan dan industri, environment berupa kepadatan lalu lintas dan kualitas hunian, serta host yang dibentuk status sosial ekonomi dan jenis pekerjaan, sebagaimana ditunjukkan DeSouza et al. (2022) bahwa kelompok berpendidikan dan berpenghasilan rendah memiliki risiko kematian lebih tinggi. Oleh karena itu, strategi pengendalian PM2.5 di wilayah urban perlu lintas sektor, meliputi pengendalian emisi, peningkatan transportasi publik, penghijauan kota, edukasi masyarakat, serta perlindungan khusus bagi pekerja luar ruangan dan kelompok berstatus sosial ekonomi rendah.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, artikel yang dianalisis memiliki variasi desain penelitian, metode pengukuran PM2.5, lokasi penelitian, serta karakteristik subjek yang berbeda-beda. Variasi tersebut dapat memengaruhi kekuatan sintesis dan membatasi generalisasi hasil. Kedua, beberapa studi menggunakan data kualitas udara dari stasiun pemantauan atau estimasi berbasis satelit, sehingga belum sepenuhnya menggambarkan paparan personal yang diterima individu dalam aktivitas sehari-hari. Ketiga, artikel

yang dianalisis berasal dari berbagai negara dengan kondisi lingkungan, sosial ekonomi, sistem kesehatan, dan tingkat polusi udara yang berbeda, sehingga interpretasi hasil perlu dilakukan secara hati-hati.

Keterbatasan lainnya adalah penggunaan database yang terbatas pada Google Scholar dan ScienceDirect, serta tidak melibatkan database utama seperti PubMed, Scopus, dan Web of Science. Hal ini memperbesar kemungkinan bahwa terdapat artikel relevan dari database tersebut belum teridentifikasi. Selain itu, rentang tahun publikasi yang dibatasi pada periode tertentu juga dapat menyebabkan tidak seluruh bukti ilmiah terdahulu tercakup dalam kajian ini. Keterbatasan database ini juga berpotensi menimbulkan publication bias, yang di mana terdapat kecenderungan terlewatnya studi dengan hasil negatif yang jarang dipublikasi, sehingga sintesis hasil cenderung mengarah pada studi yang menunjukkan hubungan positif saja. Meskipun demikian, hasil systematic literature review ini tetap memberikan gambaran mengenai hubungan paparan PM2.5 dengan gangguan pernapasan terutama pada kelompok rentan di wilayah urban.

PENUTUP

DAFTAR PUSTAKA

1. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. 2021.
2. Jonidi Jafari A, Charkhloo E, Pasalari H. Urban air pollution control policies and strategies: a systematic review. *J Environ Health Sci Eng*. 2021 Dec;19(2):1911–40. doi:10.1007/s40201-021-00744-4 PubMed PMID: 34900316.
3. Clean Air Asia, Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. Menuju Udara Bersih Jabodetabek: Sinergi Kementerian dan Daerah untuk Aksi Kolektif. 2025.
4. IQAir. 2025 World Air Quality Report. 2026.
5. IQAir. IQAir. 2026. Indonesia Air Quality Index (AQI) and Air Pollution Information.
6. Eurostat. Respiratory Diseases Statistics. 2025.
7. Eka Lolita Eliyanti Pakpahan, Enni Halimatussadiyah Pakpahan. HUBUNGAN PAPARAN POLUSI UDARA PM2,5 DENGAN RISIKO GANGGUAN KESEHATAN MASYARAKAT DI WILAYAH PERKOTAAN. *Al-Tamimi Kesmas: Jurnal Ilmu Kesehatan Masyarakat (Journal of Public Health Sciences)*. 2025 Dec 31;14(2):254–62. doi:10.35328/kesmas.v14i2.3137
8. Indonesia Environment & Energy Center (IEC). Daftar Polusi Udara 2025: Jenis, Penyebab, dan Solusi. 2025.
9. Kartika Dian Pertiwi, Ita Puji Lestari, Alfian Afandi. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan Debu PM10 dan PM2.5 pada Relawan Lalu Lintas di Jalan Diponegoro Ungaran. *Pro Health: Jurnal Ilmiah Kesehatan*. 2024;6(2):85–91.
10. deSouza P, Boing AF, Kim R, Subramanian S. Associations between ambient PM2.5 – components and age-specific mortality risk in the United States. *Environmental Advances*. 2022 Oct;9:100289. doi:10.1016/j.envadv.2022.100289

11. Liu K, Hua S, Song L. PM2.5 Exposure and Asthma Development: The Key Role of Oxidative Stress. *Oxid Med Cell Longev*. 2022 Jan 4;2022(1). doi:10.1155/2022/3618806
12. Krishna M, Madden J, Teran L, Biscione G, Lau L, Withers N, et al. Effects of 0.2 ppm ozone on biomarkers of inflammation in bronchoalveolar lavage fluid and bronchial mucosa of healthy subjects. *European Respiratory Journal*. 1998 Jun 1;11(6):1294–300. doi:10.1183/09031936.98.11061294
13. Bateson TF, Schwartz J. Children's Response to Air Pollutants. *J Toxicol Environ Health A*. 2008 Feb 20;71(3):238–43. doi:10.1080/15287390701598234
14. Hahad O, Frenis K, Kuntic M, Daiber A, Münzel T. Accelerated Aging and Age-Related Diseases (CVD and Neurological) Due to Air Pollution and Traffic Noise Exposure. *Int J Mol Sci*. 2021 Feb 28;22(5):2419. doi:10.3390/ijms22052419
15. Basith S, Manavalan B, Shin TH, Park CB, Lee WS, Kim J, et al. The Impact of Fine Particulate Matter 2.5 on the Cardiovascular System: A Review of the Invisible Killer. *Nanomaterials*. 2022 Aug 2;12(15):2656. doi:10.3390/nano12152656
16. Wang C, Tu Y, Yu Z, Lu R. PM2.5 and Cardiovascular Diseases in the Elderly: An Overview. *Int J Environ Res Public Health*. 2015 Jul 16;12(7):8187–97. doi:10.3390/ijerph120708187
17. Franck U, Odeh S, Wiedensohler A, Wehner B, Herbarth O. The effect of particle size on cardiovascular disorders — The smaller the worse. *Science of The Total Environment*. 2011 Sep;409(20):4217–21. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.05.049
18. VALAVANIDIS A, FIOTAKIS K, VLACHOGIANNI T. Airborne Particulate Matter and Human Health: Toxicological Assessment and Importance of Size and Composition of Particles for Oxidative Damage and Carcinogenic Mechanisms. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*. 2008 Dec 2;26(4):339–62. doi:10.1080/10590500802494538
19. Mills NL, Amin N, Robinson SD, Anand A, Davies J, Patel D, et al. Do Inhaled Carbon Nanoparticles Translocate Directly into the Circulation in Humans? *Am J Respir Crit Care Med*. 2006 Feb 15;173(4):426–31. doi:10.1164/rccm.200506-865OC
20. NEMMAR A, VANBILLOEN H, HOYLAERTS MF, HOET PHM, VERBRUGGEN A, NEMERY B. Passage of Intratracheally Instilled Ultrafine Particles from the Lung into the Systemic Circulation in Hamster. *Am J Respir Crit Care Med*. 2001 Nov 1;164(9):1665–8. doi:10.1164/ajrccm.164.9.2101036
21. Chu Z, Qu Y, Wang Y, Cao Y, Cao Y, Guo B, et al. Association between PM2.5 exposure with major adverse cardiovascular events and the modification of medical history and green space: A cohort study. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2025 Nov;306:119367. doi:10.1016/j.ecoenv.2025.119367
22. Adjorlolo PK, Attey-Yeboah P, Molitor J, Coker ES, Aheto JM, Amegah AK. Spatial variability in the association of ambient PM2.5 exposure with acute respiratory infection among children in Sub-Saharan Africa. *Environ Res*. 2026 Jun;299:124297. doi:10.1016/j.envres.2026.124297
23. Wahyu Setiaji. Paparan Particulate Matter 2.5 (PM2.5) dan Iklim Mikro sebagai Faktor Risiko pada Pneumonia Balita di Daerah Perkotaan. *AT-TAKLIM: Jurnal Pendidikan Multidisiplin*. 2025;2(8):85–100.
24. Wei S, Luo Z, Lannon S, Sharmin T, Smith J, Zhang H, et al. Personal air pollution exposure assessment with schoolchildren in rural Wales. *J Environ Manage*. 2026 Jan;397:128291. doi:10.1016/j.jenvman.2025.128291
25. Shumake KL, Sacks JD, Lee JS, Johns DO. Susceptibility of older adults to health effects induced by ambient air pollutants regulated by the European Union and the

- United States. *Aging Clin Exp Res*. 2013 Apr 18;25(1):3–8. doi:10.1007/s40520-013-0001-5
26. Wan L, Bambrick H, Tong M. Mortality attributable to ambient PM2.5 pollution in China's aging population. *Environ Impact Assess Rev*. 2025 Mar;112:107823. doi:10.1016/j.eiar.2025.107823
 27. Matthew J. Page, Joanne E. McKenzie, Patrick M. Bossuyt, Isabelle Boutron, Tammy C. Hoffmann, Cynthia D. Mulrow, et al. The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews. *The BMJ*. 2021;372:n71.
 28. Yu-Fei Xing, Yue-Hua Xu, Min-Hua Shi, Yi-Xin Lian. The impact of PM2.5 on the human respiratory system. *J Thorac Dis*. 2016;8(1):E69–74.
 29. Liu S, Liu J, Wang Y, Deng F, Deng Z. Oxidative Stress: Signaling Pathways, Biological Functions, and Disease. *MedComm (Beijing)*. 2025 Jul;6(7). doi:10.1002/mco2.70268
 30. Haryono. *Buku Ajar Sanitasi Lingkungan: Pengantar Epidemiologi*. Poltekkes Jogja Press; 2021.
 31. Amnuaylojaroen T, Parasin N. Future Health Risk Assessment of Exposure to PM2.5 in Different Age Groups of Children in Northern Thailand. *Toxics*. 2023 Mar 22;11(3):291. doi:10.3390/toxics11030291
 32. IQAir. WHO Air Quality Guidelines: What They Mean and Why They Matter. 2021.
 33. Heinz A. Elastic fibers during aging and disease. *Ageing Res Rev*. 2021 Mar;66:101255. doi:10.1016/j.arr.2021.101255
 34. Allen JC, Toapanta FR, Chen W, Tennant SM. Understanding immunosenescence and its impact on vaccination of older adults. *Vaccine*. 2020 Dec;38(52):8264–72. doi:10.1016/j.vaccine.2020.11.002
 35. Cho HE. 노화에 따른 호흡기계 변화의 이해. *Annals of CardioPulmonary Rehabilitation*. 2023 Dec;3(2):27–34. doi:10.53476/acpr.2023.3.2.27
 36. Environmental and Energy Study Institute (EESI). *Environmental Justice*. 2021.
 37. Kim DI, Song MK, Kim JS, Yuk JE, Kim JW, Choi J, et al. Chemical injury history increases pulmonary susceptibility to PM2.5 inhalation: Toxicological evidence for risk assessment in a neglected vulnerable population. *Environ Int*. 2025 Nov;205:109896. doi:10.1016/j.envint.2025.109896
 38. Cisneros R, Schweizer D, Amiri M, Zarate-Gonzalez G, Gharibi H. Long-Term Fine Particulate Matter (PM2.5) Trends and Exposure Patterns in the San Joaquin Valley of California. *Atmosphere (Basel)*. 2025 Jun 14;16(6):721. doi:10.3390/atmos16060721
 39. Hassan N, Mohamed L, Wilson S, Tolley C, Ahmed A, Baxter C, et al. The impact of poor air quality on hospital attendance of multimorbid patients. *Front Med (Lausanne)*. 2026 Jan 7;12. doi:10.3389/fmed.2025.1704117
 40. Liana Yulistiani, Ananda Pratama. Risiko Kesehatan Lingkungan dan Gangguan Pernapasan pada Masyarakat yang Tinggal di Sekitar Kawasan Industri di Kota Makassar, Indonesia. *Journal of Applied Health Sciences*. 2026;2(1):51–60.
 41. Yearby R, Lewis C, Gibson C. Incorporating Structural Racism, Employment Discrimination, and Economic Inequities in the Social Determinants of Health Framework to Understand Agricultural Worker Health Inequities. *Am J Public Health*. 2023 Jan;113(S1):S65–71. doi:10.2105/AJPH.2022.307166