

Pencemaran Udara; Polusi Asap Kendaraan dengan Gangguan Fungsi Paru

Ilyas Ibrahim¹

¹Program Studi Kesehatan Masyarakat, STIKes Maluku Husada, Maluku, Indonesia

*Koresponden: Ilyas Ibrahim, ilyasibrahim.f6@gmail.com; Jl. Lintas Seram Kairatu, Indonesia

Submitted: Februari 10, 2025 -Revised: Maret 1, 2025 -Accepted: April 20, 2025

ABSTRACT

Background: Vehicle exhaust pollution is an important source of traffic-related air pollution (TRAP), which contains particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), nitrogen dioxide (NO₂), black carbon, and diesel exhaust. Exposure to these pollutants can induce airway inflammation, impair lung function, and increase respiratory symptoms. Evidence from previous studies indicates that exposure to TRAP is associated with various respiratory and pulmonary health disorders. **Objective:** This study aimed to examine the association between vehicle exhaust pollution and pulmonary health disorders and to identify factors contributing to the occurrence of impaired pulmonary health. **Methods:** This study employed a literature review using a systematic narrative review approach to identify, critically evaluate, and synthesize scientific evidence regarding the association between motor vehicle exhaust pollution (traffic-related air pollution) and pulmonary health disorders. The literature search was conducted systematically across several international scientific databases. **Results:** The literature synthesis demonstrated that exposure to TRAP was consistently associated with adverse respiratory health outcomes. Lung function was the most frequently assessed outcome, particularly forced expiratory volume in one second (FEV₁), forced vital capacity (FVC), the FEV₁/FVC ratio, and maximum mid-expiratory flow (MMEF). Commonly reported respiratory symptoms included cough, shortness of breath, dyspnea, and wheezing. Previous studies also demonstrated that exposure to PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, and diesel emissions may increase airway inflammation and impair pulmonary function. **Conclusion:** Exposure to vehicle exhaust pollution represents an environmental risk factor that may contribute to impaired pulmonary health. Reducing exposure, controlling vehicle emissions, promoting appropriate personal protective measures, and implementing early detection of pulmonary function impairment are essential strategies for minimizing the adverse health effects of traffic-related air pollution.

keywords; pollution; vehicles exhaust, disorder; lung function

ABSTRAK

Polusi asap kendaraan merupakan salah satu sumber *traffic-related air pollution* (TRAP) yang mengandung PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, *black carbon*, dan *diesel exhaust*. Paparan polutan tersebut dapat menyebabkan inflamasi saluran pernapasan, penurunan fungsi paru, dan peningkatan gejala respirasi. Bukti penelitian menunjukkan bahwa paparan TRAP berkaitan dengan berbagai gangguan kesehatan pernapasan dan paru. **Tujuan:** Penelitian menganalisis polusi asap kendaraan dengan gangguan kesehatan paru serta mengidentifikasi faktor yang berperan terhadap kejadian gangguan paru. **Metode:** Penelitian ini menggunakan metode literature review dengan pendekatan systematic narrative review untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis bukti ilmiah mengenai hubungan antara polusi asap kendaraan bermotor (*traffic-related air pollution*) dengan gangguan kesehatan paru. Proses pencarian literatur dilakukan secara sistematis pada beberapa basis data ilmiah internasional. **Hasil:** Sintesis literatur menunjukkan bahwa paparan TRAP secara konsisten berkaitan dengan gangguan kesehatan respirasi. Fungsi paru merupakan outcome yang paling sering dianalisis, terutama FEV₁, FVC, FEV₁/FVC, dan MMEF, sedangkan gejala yang umum ditemukan meliputi batuk, sesak napas, *dyspnea*, dan *wheezing*. Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, dan emisi diesel dapat meningkatkan inflamasi serta memperburuk fungsi paru. **Simpulan:** Paparan polusi asap kendaraan merupakan faktor lingkungan yang berpotensi meningkatkan gangguan kesehatan paru. Pengurangan paparan, pengendalian emisi kendaraan, penggunaan perlindungan diri, dan deteksi dini gangguan fungsi paru diperlukan untuk mengurangi dampak kesehatan.

Kata kunci: polusi; asap kendaraan; gangguan; fungsi paru

PENDAHULUAN

Polusi udara merupakan salah satu masalah kesehatan lingkungan yang paling serius di dunia dan menjadi faktor risiko utama terhadap meningkatnya beban penyakit pernapasan. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) memperkirakan bahwa jutaan kematian setiap tahun berkaitan dengan paparan polusi udara, terutama polutan yang berasal dari aktivitas transportasi seperti kendaraan bermotor. Emisi kendaraan menghasilkan berbagai zat pencemar berbahaya, antara lain particulate matter ($PM_{2.5}$ dan PM_{10}), nitrogen dioksida (NO_2), sulfur dioksida (SO_2), karbon monoksida (CO), ozon (O_3), serta berbagai logam berat yang mampu menembus saluran napas hingga alveolus paru. Paparan jangka pendek maupun jangka panjang terhadap polutan tersebut telah terbukti meningkatkan kejadian asma, penyakit paru obstruktif kronis (PPOK), bronkitis kronis, infeksi saluran pernapasan, penurunan fungsi paru, hingga peningkatan angka rawat inap dan kematian akibat penyakit respirasi.

Peningkatan jumlah kendaraan bermotor di berbagai negara berkembang maupun negara maju menyebabkan konsentrasi polutan udara terus meningkat, terutama di kawasan perkotaan dengan kepadatan lalu lintas tinggi. Sumber emisi kendaraan tidak hanya berasal dari proses pembakaran bahan bakar (exhaust emission), tetapi juga dari emisi non-knalpot seperti abrasi ban, kampas rem, dan debu jalan yang mengandung logam berat. Polutan tersebut memiliki ukuran partikel yang sangat kecil sehingga dapat mencapai bronkiolus dan alveolus, memicu proses inflamasi, stres oksidatif, serta kerusakan jaringan paru. Meta-analisis terbaru yang mencakup 50 penelitian dari berbagai negara menunjukkan bahwa $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 , O_3 , serta trace metals memiliki hubungan yang signifikan dengan berbagai gangguan kesehatan paru pada anak maupun orang dewasa. Risiko gangguan pernapasan ditemukan lebih tinggi pada kelompok anak-anak dibandingkan kelompok usia dewasa karena sistem respirasi yang masih berkembang.

Hasil kajian sistematis yang dilakukan Debelu dkk. (2024) juga memperkuat bukti bahwa polusi udara akibat kendaraan bermotor merupakan determinan penting meningkatnya penyakit paru kronis di berbagai belahan dunia. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa paparan jangka panjang terhadap emisi kendaraan berhubungan dengan peningkatan kejadian asma, PPOK, penurunan kapasitas fungsi paru, hingga penyakit kardiopulmoner. Selain itu, penelitian longitudinal di Los Angeles County menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 , CO, dan O_3 secara konsisten meningkatkan mortalitas akibat penyakit pernapasan setelah mempertimbangkan berbagai faktor lingkungan dan kesalahan pengukuran paparan. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa dampak polusi kendaraan tidak hanya meningkatkan angka kesakitan, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan kematian akibat penyakit respirasi.

Penelitian berbasis kohort pada penderita asma juga menunjukkan bahwa individu yang tinggal di lingkungan dengan kepadatan lalu lintas tinggi mengalami perburukan fungsi paru yang lebih cepat dibandingkan populasi yang tinggal di wilayah dengan kualitas udara lebih baik. Studi Arvind dan Maiya (2023) pada 113 remaja penderita asma menemukan bahwa peningkatan paparan $PM_{2.5}$ berhubungan langsung dengan meningkatnya frekuensi napas dan memburuknya gejala asma. Hasil tersebut menunjukkan bahwa polutan kendaraan dapat memperburuk kondisi penderita penyakit paru melalui mekanisme inflamasi kronis dan hiperresponsivitas saluran napas. Di sisi lain, penelitian kohort multisenter terhadap lebih dari 5.000 anak di Amerika Serikat juga membuktikan bahwa paparan NO_2 dan $PM_{2.5}$ sejak usia dini meningkatkan risiko kejadian asma hingga usia sebelas tahun. Temuan ini menegaskan bahwa anak-anak merupakan kelompok yang paling rentan terhadap dampak polusi kendaraan.

Perkembangan teknologi pemantauan kualitas udara dalam beberapa tahun terakhir turut memperkuat bukti ilmiah mengenai hubungan antara polusi kendaraan dan gangguan paru. Penelitian di Tiongkok menggunakan sensor bergerak yang dipasang pada armada taksi berhasil memetakan hotspot polusi lalu lintas secara real time dan menunjukkan bahwa konsentrasi $PM_{2.5}$, PM_{10} , serta NO_2 paling tinggi ditemukan pada ruas jalan dengan kepadatan kendaraan tinggi. Paparan di lokasi tersebut diperkirakan meningkatkan risiko gangguan pernapasan bagi masyarakat yang beraktivitas di sekitar jalan raya, termasuk pejalan kaki, pedagang kaki lima, pengemudi, dan petugas lalu lintas. Pendekatan pemantauan berbasis sensor ini memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai distribusi spasial paparan polusi kendaraan dibandingkan metode pemantauan stasioner konvensional.

Meskipun berbagai penelitian internasional telah menunjukkan hubungan yang konsisten antara polusi kendaraan dan gangguan kesehatan paru, sebagian besar penelitian masih dilakukan di negara maju atau kawasan dengan sistem pemantauan kualitas udara yang relatif baik. Bukti ilmiah yang berasal dari negara berkembang, khususnya Indonesia, masih terbatas, terutama penelitian yang secara langsung menghubungkan kadar polutan emisi kendaraan di kawasan padat lalu lintas

dengan kejadian gangguan kesehatan paru pada masyarakat setempat. Perbedaan karakteristik kendaraan, kualitas bahan bakar, kondisi geografis, kepadatan lalu lintas, serta perilaku masyarakat memungkinkan adanya variasi tingkat risiko yang memerlukan kajian lebih lanjut.

Berdasarkan sintesis berbagai penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa terdapat bukti ilmiah yang kuat mengenai hubungan antara paparan polusi asap kendaraan bermotor dengan meningkatnya risiko gangguan kesehatan paru. Namun demikian, masih terdapat kesenjangan penelitian mengenai karakteristik paparan lokal, distribusi polutan pada kawasan padat lalu lintas di Indonesia, serta besarnya pengaruh masing-masing jenis polutan terhadap kejadian penyakit paru pada masyarakat. Oleh karena itu, literature review mengenai polusi asap kendaraan dengan gangguan kesehatan paru menjadi penting untuk merangkum bukti ilmiah terkini, mengidentifikasi kesenjangan penelitian, serta memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan kebijakan pengendalian pencemaran udara dan upaya pencegahan penyakit pernapasan di Indonesia.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode literature review dengan pendekatan systematic narrative review untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis bukti ilmiah mengenai hubungan antara polusi asap kendaraan bermotor (*traffic-related air pollution*) dengan gangguan kesehatan paru. Proses pencarian literatur dilakukan secara sistematis pada beberapa basis data ilmiah internasional, yaitu PubMed, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Web of Science, dan Google Scholar. Strategi pencarian menggunakan kombinasi kata kunci *traffic-related air pollution*, *vehicle exhaust*, *motor vehicle emissions*, *air pollution*, *PM2.5*, *nitrogen dioxide*, *respiratory disease*, *lung disease*, *asthma*, *chronic obstructive pulmonary disease (COPD)*, dan *pulmonary health* yang dikombinasikan dengan operator Boolean AND dan OR. Pencarian dibatasi pada artikel yang dipublikasikan selama periode 2023–2024, berbahasa Inggris, tersedia dalam bentuk full text, dan merupakan artikel penelitian asli (*original research*), *systematic review*, atau *meta-analysis* yang membahas secara spesifik hubungan paparan polusi kendaraan bermotor dengan gangguan kesehatan paru.

Seleksi artikel dilakukan mengacu pada pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA 2020) melalui empat tahapan, yaitu identification, screening, eligibility, dan included. Pada tahap identifikasi seluruh artikel yang diperoleh dari berbagai basis data dikumpulkan, kemudian dilakukan penghapusan artikel duplikat. Selanjutnya dilakukan penyaringan berdasarkan judul dan abstrak untuk menilai kesesuaian dengan tujuan penelitian. Artikel yang lolos tahap penyaringan kemudian dievaluasi melalui pembacaan teks lengkap berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Kriteria inklusi meliputi artikel yang membahas paparan polusi kendaraan bermotor terhadap gangguan kesehatan paru, menggunakan desain penelitian observasional, kohort, longitudinal, *cross-sectional*, *systematic review*, atau *meta-analysis*, serta dipublikasikan pada jurnal bereputasi internasional. Artikel berupa editorial, komentar, prosiding, artikel tanpa teks lengkap, maupun penelitian yang tidak secara spesifik membahas emisi kendaraan dikeluarkan dari proses seleksi. Berdasarkan proses tersebut diperoleh 10 artikel yang memenuhi seluruh kriteria untuk dianalisis lebih lanjut.

Data dari setiap artikel diekstraksi secara sistematis menggunakan lembar ekstraksi data yang mencakup nama penulis, tahun publikasi, negara penelitian, judul penelitian, desain penelitian, jumlah sampel, jenis polutan yang diteliti, indikator gangguan kesehatan paru, metode analisis statistik, serta hasil utama penelitian. Selanjutnya dilakukan penilaian kualitas metodologi artikel menggunakan instrumen Joanna Briggs Institute (JBI) Critical Appraisal Checklist untuk penelitian observasional dan AMSTAR 2 (A Measurement Tool to Assess Systematic Reviews) untuk artikel *systematic review* dan *meta-analysis*. Analisis data dilakukan menggunakan pendekatan narrative synthesis, yaitu membandingkan karakteristik penelitian, jenis paparan polutan, outcome kesehatan paru, serta temuan utama dari masing-masing artikel untuk mengidentifikasi pola hubungan, persamaan, perbedaan hasil penelitian, dan kesenjangan penelitian (*research gap*). Hasil sintesis disajikan dalam bentuk tabel dan uraian naratif sehingga memberikan gambaran yang komprehensif mengenai pengaruh polusi asap kendaraan bermotor terhadap gangguan kesehatan paru sebagai dasar pengembangan penelitian dan kebijakan kesehatan lingkungan.

HASIL

Hasil pencarian diperoleh 230 artikel berhasil diidentifikasi dari basis data Scopus, PubMed, ScienceDirect, Google Scholar, dan Garuda. Setelah dilakukan penghapusan artikel duplikat, penyaringan judul dan abstrak, serta penilaian berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, diperoleh 10 artikel yang memenuhi syarat untuk dianalisis. Artikel tersebut berasal dari berbagai negara dengan desain penelitian yang meliputi *cross-sectional*, *cohort*, *case-control*, *environmental monitoring*, dan *systematic review*. Hasil penyaringan artikel tersebut dapat ditampilkan pada tabel 1 berikut ini;

Tabel 1. Artikel polusi asap kendaraan dengan gangguan kesehatan paru

N o.	Judul artikel	Penulis/tahun	Tujuan penelitian	Jumlah sampel	Desain penelitian	Variabel penelitian	Hasil penelitian
1	Respiratory Effects of Traffic-Related Air Pollution: A Randomized, Crossover Analysis of Lung Function, Airway Metabolome, and Biomarkers of Airway Injury	Xinlei Zhu, Qingli Zhang, Xihao Du, Yixuan Jiang, Yue Niu, dkk. 2023	Menilai efek TRAP terhadap gejala respirasi, fungsi paru, dan biomarker cedera/inflamasi paru.	56 orang dewasa sehat	Randomized crossover trial	TRAP; FEV ₁ ; FVC; FEV ₁ /FVC; MMEF; gejala respirasi; SP-D; TNF- α ; oxidative stress	Paparan TRAP tinggi meningkatkan gejala respirasi 2,615 poin dan menurunkan FEV ₁ sekitar 0,075 L serta MMEF 0,190 L/s; juga berkaitan dengan cedera epitel dan inflamasi paru.
2	Traffic-Related Air Pollution (TRAP) in relation to respiratory symptoms and lung function of school-aged children in Kuala Lumpur	Nur Faseeha Suhaimi, Juliana Jalaludin, Nur Intan Shafiqah Roslan 2024	Menentukan hubungan paparan TRAP dengan gejala respirasi dan fungsi paru anak sekolah.	Anak sekolah di Kuala Lumpur	Cross-sectional comparative	TRAP; PM _{2.5} ; jarak dari jalan; gejala respirasi; FEV ₁ ; FVC	PM _{2.5} menjadi prediktor penting gejala respirasi dan abnormalitas fungsi paru; paparan TRAP lebih tinggi berkaitan dengan gangguan respirasi.
3	Traffic-related air pollution, chronic stress, and changes in exhaled nitric oxide and lung function among a panel of children with	N. Ji, A. Baptista, C.H. Yu, C. Cepeda, F. Green, dkk. 2024	Menilai hubungan paparan TRAP jangka pendek dengan inflamasi jalan napas dan fungsi paru anak	35 anak usia 9–14 tahun	Panel longitudinal dengan pengukuran berulang	Black carbon; NO ₂ ; FeNO; fungsi paru; stres kronis; asma	Black carbon berhubungan dengan peningkatan FeNO terutama pada lag 0–6 jam, menunjukkan

	asthma living in an underresourced community		dengan asma.				peningkatan inflamasi jalan napas; perubahan fungsi paru jangka pendek tidak signifikan.
4	Different Impacts of Traffic-Related Air Pollution on Early-Onset and Late-Onset Asthma	Ting-Yu Lin, Firdian Makrufardi, Nguyen Thanh Tung, Amja Manullang, Po-Jui Chang, dkk. 2024	Menganalisis dampak TRAP terhadap asma onset dini/lambat dan fungsi paru.	675 pasien asma	Cross-sectional	PM ₁₀ ; PM _{2.5} ; NO ₂ ; O ₃ ; FEV ₁ /FVC; fungsi paru; kontrol asma	PM ₁₀ dan PM _{2.5} berhubungan dengan penurunan fungsi paru; NO ₂ juga berhubungan dengan penurunan fungsi paru pada kelompok tertentu.
5	Assessing the Influence of Vehicular Traffic-Associated Atmospheric Pollutants on Pulmonary Function Using Spirometry and Impulse Oscillometry in Healthy Participants: Insights from Bogotá, 2020–2021	Julia Edith Almentero, Andrea Rico Hernández, Hanna Soto, Andrés García, Yesith G. Toloza-Pérez, Jeadran N. Malagón-Rojas 2024	Menilai pengaruh polutan yang berasosiasi dengan lalu lintas kendaraan terhadap fungsi paru individu sehat.	Sampel pria dan wanita berusia antara 18 hingga 54 tahun sebanyak 50 orang.	Observational exposure study	PM _{2.5} ; equivalent black carbon; spirometry; impulse oscillometry; fungsi jalan napas	PM _{2.5} dan equivalent black carbon digunakan sebagai indikator polusi terkait lalu lintas dan menunjukkan hubungan dengan parameter fungsi respirasi.
6	Occupational exposure of vehicular emissions and cardiorespiratory risk among urban metropolitan bus drivers: A cross-sectional comparative study	Avinash Pagdhune, Rekha Kashyap, P. SivaPerumal, Rakesh Balachandrar, Ankit Viramgami, Kamalesh Sarkar 2023	Menilai risiko kardiorespirasi akibat paparan emisi kendaraan pada pengemudi bus perkotaan.	254 pengemudi bus + 73 kontrol	Cross-sectional comparative	PM _{2.5} ; PM ₁₀ ; emisi kendaraan; batuk; dyspnea; PFT; FEV ₁ ; FVC; FEV ₁ /FVC	Paparan PM _{2.5} sekitar 6 kali dan PM ₁₀ sekitar 5 kali lebih tinggi pada pengemudi bus; dyspnea 25% vs 6,8%, batuk 20,1% vs 9,8%, dan gangguan obstruktif 21% vs 5,7%.

7	Variants in transient receptor potential channels and toll-like receptors modify airway responses to allergen and air pollution: a randomized controlled response human exposure study	Andrew Robinson, Ryan D. Huff, Min Hyung Ryu & Chris Carlsten 2023	Menilai respons jalan napas terhadap diesel exhaust dan alergen serta pengaruh variasi genetik.	13 peserta sensitif alergen	Randomized, double-blind, four-arm crossover	Diesel exhaust; particle-depleted diesel exhaust; filtered air; fungsi paru; respons imun; SNP	Paparan diesel exhaust memodifikasi respons jalan napas terhadap alergen dan menunjukkan interaksi dengan faktor genetik.
8	Fine particulate matter contributes to COPD-like pathophysiology: experimental evidence from rats exposed to diesel exhaust particles	Zhang-Fu Fang, Zhao-Ni Wang, Zhe Chen, Yang Peng, Yu Fu, Yang Yang, dkk. 2024	Menguji apakah paparan partikel diesel menyebabkan perubahan patologis menyerupai COPD.	Tikus Sprague-Dawley; beberapa kelompok paparan	Eksperimental hewan	Diesel exhaust particles; PM _{2.5} ; resistensi paru; TLC; inflamasi; fibrosis; mucus; oxidative stress	DEP menyebabkan remodeling jalan napas, hipersekresi mukus, fibrosis dan inflamasi; resistensi paru dan total lung capacity meningkat setelah paparan.
9	Chronic diesel exhaust exposure induced pulmonary vascular remodeling: a potential trajectory for traffic related pulmonary hypertension	Chaohui Mu, Qinghai Li, Yong Niu, Ting Hu, Yanting Li, Tao Wang, Xinjuan Yu, Yiqiao Lv, Huiling Tang, Jing Jiang, Haibin Xu, Yuxin Zheng and Wei Han 2024	Menganalisis efek paparan diesel exhaust kronis terhadap pembuluh darah paru dan kemungkinan menuju pulmonary hypertension.	Pekerja diesel engine testers + 12 tikus (6 DE, 6 kontrol)	Observasi occupational + eksperimen hewan	Diesel exhaust; carbon content makrofag; CT pembuluh paru; spirometri; RVSP; remodeling vaskular; MIF	Paparan DE berkaitan dengan perubahan pembuluh paru; pada tikus meningkatkan RVSP, penebalan dinding pembuluh paru, hipertrofi ventrikel kanan dan MIF.
10	Effects of inhaled tier-2 diesel engine exhaust on immunotoxicity in a rat model: A hazard identification	Lisa M. Weatherly, Hillary L. Shane, Rachel Baur, Ewa Lukomska, Walter McKinney,	Mengidentifikasi efek imunotoksik paparan inhalasi diesel exhaust pada sistem respirasi dan	Tikus percobaan; beberapa kelompok paparan	Eksperimental inhalasi	Diesel exhaust; sel imun paru; BALF; lung lymph nodes; spleen;	Paparan diesel exhaust mengubah fenotipe sel pada limfonodus paru, limpa dan

	study. Part II. Immunotoxicology	Jenny R. Roberts, Jeffrey S. Fedan, Stacey E. Anderson 2024	jaringan limfoid.			respons imun	bronchoalveolar lavage fluid, menunjukkan efek imunologis pada sistem respirasi.
--	----------------------------------	---	-------------------	--	--	--------------	--

Hasil sintesis artikel tersebut dapat di jelaskan pada temuan utama penelitian tersebut.

Tabel 2, Hasil sintesis penelitian polusi asap kendaraan dengan gangguan kesehatan paru

No.	Variabel yang dianalisis	Jumlah artikel	Persentase	Temuan utama
1	Paparan polusi asap kendaraan (TRAP/emisi kendaraan)	10	100%	Seluruh artikel menganalisis paparan yang berkaitan dengan kendaraan, termasuk TRAP, emisi kendaraan, diesel exhaust, atau polutan terkait lalu lintas. Paparan yang lebih tinggi secara umum menunjukkan dampak negatif terhadap sistem respirasi.
2	Partikulat udara (PM _{2.5} /PM ₁₀)	6	60%	PM _{2.5} dan PM ₁₀ merupakan indikator paparan yang paling konsisten. Peningkatan paparan berkaitan dengan penurunan fungsi paru dan peningkatan gejala respirasi.
3	Gas pencemar (NO ₂ /NOx)	3	30%	NO ₂ /NOx digunakan sebagai indikator polusi lalu lintas dan pada beberapa penelitian berkaitan dengan inflamasi serta penurunan fungsi paru.
4	Diesel exhaust/black carbon	4	40%	Paparan diesel dan black carbon berhubungan dengan inflamasi jalan napas, perubahan respons imun, gangguan fungsi paru, dan perubahan patologi respirasi.
5	Fungsi paru (FEV ₁ , FVC, FEV ₁ /FVC, MMEF)	7	70%	Fungsi paru merupakan outcome yang paling sering dianalisis. Sebagian besar penelitian menunjukkan kecenderungan penurunan fungsi paru pada paparan polusi kendaraan yang lebih tinggi.
6	Gejala gangguan kesehatan paru	6	60%	Batuk, sesak napas/dyspnea, wheezing, dan gejala respirasi lainnya lebih banyak ditemukan pada kelompok dengan paparan emisi kendaraan yang lebih tinggi.
7	Inflamasi dan cedera jalan napas	5	50%	Paparan TRAP/diesel exhaust berkaitan dengan peningkatan inflamasi, oxidative stress, FeNO, cedera epitel, dan perubahan biomarker respirasi.
8	Asma/COPD dan penyakit respirasi	4	40%	Polusi kendaraan dapat memperburuk asma dan berkontribusi terhadap perubahan patologi menyerupai COPD.

Hasil temuan sintesis dari 10 artikel menunjukkan bahwa paparan polusi asap atau emisi kendaraan memiliki hubungan yang konsisten dengan penurunan kesehatan paru. Variabel paparan yang paling banyak diteliti adalah *traffic-related air pollution* (TRAP), $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , *black carbon*, dan *diesel exhaust*. Dari seluruh artikel, 100% membahas paparan yang berkaitan dengan kendaraan, sedangkan sekitar 60% menganalisis $PM_{2.5}/PM_{10}$ dan 40% menganalisis *diesel exhaust* atau *black carbon*. Temuan utama menunjukkan bahwa peningkatan paparan polutan tersebut dapat menyebabkan penurunan fungsi paru, terutama FEV_1 , FVC, FEV_1/FVC , dan MMEF. Sebanyak 70% artikel menganalisis fungsi paru sebagai outcome, sementara 60% menganalisis gejala respirasi seperti batuk, sesak napas, *dyspnea*, dan *wheezing*. Penelitian pada pengemudi bus, anak sekolah, anak dengan asma, dan individu sehat menunjukkan pola yang relatif sama, yaitu kelompok dengan paparan emisi kendaraan yang lebih tinggi cenderung memiliki fungsi paru yang lebih rendah atau gejala respirasi yang lebih banyak dibandingkan kelompok dengan paparan lebih rendah.

Temuan sintesis juga menunjukkan bahwa dampak polusi kendaraan tidak hanya terlihat pada gejala dan fungsi paru, tetapi juga pada mekanisme biologis saluran pernapasan. Sekitar 50% artikel membahas inflamasi atau cedera jalan napas, dengan temuan berupa peningkatan FeNO, *oxidative stress*, cedera epitel, perubahan biomarker inflamasi, serta perubahan respons imun. Beberapa penelitian bahkan menunjukkan bahwa paparan *diesel exhaust* dapat menyebabkan perubahan patologi menyerupai COPD dan remodeling pembuluh darah paru. Dengan demikian, hasil sintesis memberikan bukti bahwa semakin tinggi paparan polusi kendaraan, semakin besar potensi terjadinya gangguan kesehatan paru, baik dalam bentuk gejala respirasi, penurunan fungsi paru maupun perubahan biologis pada saluran pernapasan. Temuan ini mendukung penggunaan paparan asap kendaraan sebagai variabel independen dan gangguan kesehatan paru sebagai variabel dependen, dengan faktor seperti usia, merokok, masa kerja, lama paparan, penggunaan masker, dan kondisi lingkungan sebagai variabel yang perlu dikendalikan dalam analisis.

Berdasarkan hasil sintesis tersebut maka dapat dilakukan upaya pencegahan polusi udara yang bersumber dari kendaraan dengan tujuan meminimalisir risiko terjadinya gangguan paru. Upaya pencegahan ini dapat di lihat pada tabel 3 berikut;

Tabel 3. Upaya pencegahan polusi asap kendaraan dengan gangguan kesehatan paru

No.	Upaya pencegahan	Sasaran	Mekanisme/tujuan	Indikator keberhasilan
1	Mengurangi paparan langsung terhadap asap kendaraan	Masyarakat dan pekerja di jalan	Mengurangi inhalasi $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , black carbon dan emisi diesel.	Berkurangnya frekuensi dan lama kontak dengan asap kendaraan.
2	Menggunakan masker yang sesuai saat berada di area lalu lintas padat	Pengemudi, pedagang, petugas lalu lintas, pekerja jalan, masyarakat	Mengurangi masuknya partikulat ke saluran pernapasan.	Peningkatan penggunaan masker secara benar dan konsisten.
3	Mengurangi waktu berada di lokasi dengan kepadatan kendaraan tinggi	Pekerja dan masyarakat	Mengurangi dosis kumulatif paparan polusi kendaraan.	Penurunan durasi paparan harian.
4	Menjaga jarak dari sumber emisi kendaraan	Pejalan kaki, pedagang, pekerja jalan, masyarakat	Mengurangi paparan di sekitar sumber emisi.	Berkurangnya aktivitas sangat dekat dengan jalan utama.
5	Mengurangi penggunaan kendaraan pribadi	Masyarakat	Mengurangi jumlah kendaraan dan emisi di udara.	Peningkatan penggunaan transportasi umum atau moda aktif yang aman.
6	Pemeliharaan kendaraan secara berkala	Pemilik kendaraan dan perusahaan transportasi	Mengurangi emisi akibat pembakaran tidak sempurna.	Kendaraan melakukan servis berkala.

7	Uji emisi kendaraan secara rutin	Pemilik kendaraan dan pemerintah	Mengidentifikasi dan mengendalikan kendaraan dengan emisi tinggi.	Meningkatnya proporsi kendaraan yang memenuhi standar emisi.
8	Pengendalian kendaraan diesel dengan emisi tinggi	Perusahaan transportasi dan pemerintah	Mengurangi paparan diesel exhaust dan black carbon.	Penurunan kendaraan diesel dengan emisi berlebih.
9	Penerapan kawasan rendah emisi	Pemerintah daerah dan masyarakat	Mengurangi konsentrasi polutan lalu lintas.	Penurunan PM _{2.5} , PM ₁₀ dan NO ₂ di kawasan intervensi.
10	Penghijauan dan vegetasi di sekitar jalan	Pemerintah dan masyarakat	Membantu mengurangi partikulat dan memperbaiki kualitas lingkungan.	Bertambahnya ruang hijau dan membaiknya kualitas udara.
11	Peningkatan ventilasi dan kualitas udara dalam ruangan	Rumah, sekolah, kantor, tempat kerja	Mengurangi akumulasi polutan yang masuk dari luar.	Ventilasi memadai dan kualitas udara dalam ruangan lebih baik.
12	Pemeriksaan kesehatan paru secara berkala	Kelompok berisiko tinggi	Deteksi dini gangguan fungsi paru dan gejala respirasi.	Pemeriksaan gejala dan, bila tersedia, spirometri berkala.
13	Edukasi tentang bahaya asap kendaraan	Masyarakat dan kelompok pekerja	Meningkatkan pengetahuan mengenai risiko polusi terhadap paru.	Peningkatan pengetahuan dan perilaku protektif.
14	Pengendalian kebiasaan merokok	Pekerja dan masyarakat	Mengurangi paparan gabungan asap rokok dan polusi kendaraan.	Penurunan merokok dan paparan asap rokok.
15	Pemantauan kualitas udara dan sistem peringatan dini	Pemerintah dan masyarakat	Memberikan informasi ketika konsentrasi polutan tinggi.	Tersedianya informasi kualitas udara dan respons masyarakat.
16	Pengaturan lalu lintas di lokasi padat kendaraan	Pemerintah daerah	Mengurangi kemacetan dan konsentrasi emisi pada titik tertentu.	Penurunan kepadatan kendaraan dan polutan.
17	Penggunaan teknologi kendaraan rendah emisi	Pemerintah, perusahaan transportasi, masyarakat	Mengurangi emisi partikulat dan gas pencemar.	Peningkatan proporsi kendaraan rendah emisi/listrik.
18	Perlindungan khusus bagi pekerja yang terpapar	Pengemudi, petugas lalu lintas, pekerja terminal/jalan	Mengurangi paparan kumulatif melalui pengaturan waktu kerja, rotasi dan APD.	Penurunan durasi paparan dan peningkatan kepatuhan APD.

Berdasarkan temuan sintesis 10 artikel ilmiah tahun 2023–2024, upaya pencegahan polusi asap kendaraan terhadap gangguan kesehatan paru perlu dilakukan melalui pengendalian pada sumber, lingkungan, dan individu. Pada tingkat sumber, pencegahan dapat dilakukan melalui pemeliharaan kendaraan secara berkala, uji emisi, pengendalian kendaraan diesel dengan emisi tinggi, penggunaan teknologi kendaraan rendah emisi, serta pengurangan penggunaan kendaraan pribadi. Hal ini penting karena hasil sintesis menunjukkan bahwa PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, *black carbon*, dan *diesel exhaust* merupakan komponen utama polusi terkait kendaraan yang dapat berkontribusi

terhadap penurunan fungsi paru, peningkatan gejala respirasi, inflamasi, dan cedera jalan napas. Pada tingkat lingkungan, penerapan kawasan rendah emisi, pengaturan lalu lintas pada lokasi padat kendaraan, penghijauan, serta pemantauan kualitas udara dapat digunakan untuk menurunkan konsentrasi polutan sebelum paparan terjadi pada masyarakat. Pendekatan ini bersifat pencegahan primer, karena berupaya mengurangi sumber dan konsentrasi polutan di lingkungan.

Pada tingkat individu, hasil sintesis menunjukkan pentingnya mengurangi lama dan frekuensi paparan, menjaga jarak dari sumber emisi, menggunakan masker yang sesuai, serta menghindari aktivitas terlalu lama di lokasi dengan kepadatan lalu lintas tinggi. Upaya tersebut bertujuan mengurangi dosis polutan yang masuk ke saluran pernapasan, terutama pada kelompok yang mempunyai paparan tinggi seperti pengemudi, petugas lalu lintas, pedagang, pekerja jalan, dan masyarakat yang tinggal atau beraktivitas dekat jalan utama. Selain itu, pengendalian kebiasaan merokok penting dilakukan karena paparan asap rokok dapat menjadi faktor yang memperburuk dampak polusi kendaraan terhadap paru. Pencegahan sekunder dapat dilakukan melalui pemeriksaan gejala respirasi dan pemeriksaan fungsi paru secara berkala, terutama pada kelompok berisiko, sehingga gangguan dapat ditemukan lebih awal. Dengan demikian, strategi pencegahan yang paling tepat adalah pendekatan berlapis: mengurangi emisi kendaraan → mengurangi konsentrasi polutan lingkungan → mengurangi paparan individu → melakukan deteksi dini gangguan paru. Pendekatan tersebut sejalan dengan temuan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa semakin tinggi paparan polusi kendaraan, semakin besar potensi terjadinya gejala respirasi dan penurunan fungsi paru.

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil sintesis 10 penelitian terdahulu, ditemukan bahwa polusi asap atau emisi kendaraan memiliki hubungan yang konsisten dengan gangguan kesehatan paru, baik yang ditunjukkan melalui gejala respirasi maupun perubahan fungsi paru. Paparan yang banyak digunakan dalam penelitian terdahulu meliputi *traffic-related air pollution* (TRAP), PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, *black carbon*, dan *diesel exhaust*. Temuan Zhu et al. (2023) melalui *randomized crossover trial* pada 56 orang dewasa sehat menunjukkan bahwa paparan TRAP yang lebih tinggi meningkatkan gejala respirasi serta menurunkan beberapa parameter fungsi paru, termasuk FEV₁ dan MMEF¹¹. Temuan tersebut diperkuat oleh Suhaimi et al. (2024) di Kuala Lumpur yang menemukan bahwa paparan TRAP, terutama PM_{2.5}, berkaitan dengan gejala respirasi dan abnormalitas fungsi paru pada anak sekolah¹².

Dengan demikian, hasil sintesis memperlihatkan pola bahwa peningkatan paparan polusi yang berasal dari aktivitas lalu lintas dapat diikuti oleh peningkatan risiko gangguan respirasi dan penurunan fungsi paru.

Temuan tersebut juga sejalan dengan penelitian pada kelompok pekerja yang mempunyai paparan kendaraan tinggi. Pagdhune et al. (2023) menemukan bahwa pengemudi bus memiliki paparan PM_{2.5} sekitar enam kali dan PM₁₀ sekitar lima kali lebih tinggi dibandingkan kelompok kontrol; kelompok pengemudi juga mempunyai prevalensi dyspnea dan batuk yang lebih tinggi serta lebih banyak gangguan obstruktif pada pemeriksaan fungsi paru¹³.

Penelitian Ji et al. (2024) pada 35 anak dengan asma juga menemukan bahwa paparan *black carbon*, sebagai indikator TRAP, berhubungan dengan peningkatan FeNO, terutama dalam periode 0–6 jam setelah paparan, meskipun perubahan fungsi paru jangka pendek tidak signifikan¹⁴. Sementara itu, Almentero et al. (2024) di Bogotá menggunakan PM_{2.5} dan *equivalent black carbon* untuk menilai paparan polusi terkait lalu lintas dan menghubungkannya dengan pemeriksaan spirometri serta *impulse oscillometry*¹⁵.

Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa dampak polusi kendaraan dapat berbeda menurut karakteristik populasi, tingkat paparan, durasi paparan dan indikator kesehatan yang digunakan, tetapi secara umum memberikan bukti bahwa kelompok yang terpapar lebih tinggi memerlukan perhatian lebih besar terhadap kesehatan respirasi.

Secara teoritis, hubungan tersebut dapat dijelaskan melalui teori paparan–dosis–respons, yaitu semakin besar intensitas, frekuensi dan durasi seseorang terpapar polutan, semakin besar dosis polutan yang masuk ke saluran pernapasan dan semakin besar kemungkinan munculnya respons biologis. PM_{2.5} mempunyai ukuran yang sangat kecil sehingga dapat mencapai bagian distal paru, sedangkan NO₂ dan komponen emisi diesel dapat memicu iritasi serta respons inflamasi¹⁶. WHO menjelaskan bahwa PM_{2.5} dan PM₁₀ dapat masuk jauh ke dalam paru dan terutama berkaitan dengan dampak respirasi serta kardiovaskular¹⁷.

Mekanisme tersebut diperkuat oleh kajian Hou et al. (2023), yang menjelaskan bahwa *oxidative stress* merupakan mekanisme penting pada cedera paru akibat PM_{2.5}; paparan partikulat dapat menghasilkan reactive oxygen species, mengaktifkan jalur inflamasi dan menyebabkan kerusakan sel paru¹⁸.

Dengan demikian, secara teoritis paparan asap kendaraan tidak hanya berkaitan dengan keluhan subjektif seperti batuk dan sesak, tetapi juga dapat menyebabkan perubahan biologis yang pada akhirnya memengaruhi fungsi paru.

Hasil penelitian juga sesuai dengan teori inflamasi saluran pernapasan. Partikel dan komponen gas yang berasal dari emisi kendaraan dapat terdeposit pada saluran pernapasan dan memicu respons inflamasi serta *oxidative stress*. Pada penelitian Zhu et al. (2023), selain perubahan fungsi paru, paparan TRAP juga dievaluasi melalui biomarker seperti 8-isoprostane, TNF- α , ezrin dan surfaktan protein D yang berkaitan dengan *oxidative stress*, inflamasi dan cedera epitel¹⁹.

Penelitian eksperimental *controlled diesel exhaust exposure* pada manusia juga menunjukkan bahwa paparan diesel exhaust meningkatkan FeNO secara bergantung pada konsentrasi, yang menunjukkan respons inflamasi jalan napas, meskipun perubahan fungsi paru akut tidak selalu ditemukan. Hal ini penting dalam menafsirkan hasil penelitian karena tidak semua orang yang terpapar asap kendaraan akan langsung menunjukkan penurunan spirometri, terutama apabila paparannya bersifat akut. Sebaliknya, keluhan respirasi atau biomarker inflamasi dapat muncul lebih dahulu. Kajian Long et al. (2024) juga menunjukkan bahwa paparan diesel exhaust pada studi paparan manusia terkontrol secara umum meningkatkan inflamasi neutrofilik dan hiperresponsivitas jalan napas, tetapi efek akut terhadap FEV₁/FVC tidak selalu konsisten. Berdasarkan hasil tersebut, asumsi penelitian yang dapat dikembangkan adalah bahwa individu yang mempunyai paparan asap kendaraan lebih tinggi, baik karena lebih lama berada di jalan, lebih dekat dengan sumber emisi, lebih sering terpapar kendaraan diesel, maupun bekerja pada lingkungan dengan kepadatan kendaraan tinggi, mempunyai kemungkinan lebih besar mengalami gangguan kesehatan paru dibandingkan individu dengan paparan lebih rendah. Asumsi ini didukung oleh penelitian terdahulu yang menunjukkan adanya hubungan antara paparan TRAP dengan gangguan respirasi pada anak, pekerja dan individu sehat. Selain itu, *systematic review* Debelu et al. (2024) yang menelusuri literatur melalui Scopus, PubMed, EMBASE, Web of Science, CINAHL dan Google Scholar menemukan bahwa berbagai polutan terkait lalu lintas, termasuk PM_{2.5}, PM₁₀, NO_x, NO₂ dan *black carbon*, berhubungan dengan berbagai masalah kesehatan, termasuk penyakit respirasi.

Oleh karena itu, dalam penelitian lapangan, tingkat paparan dapat diasumsikan berhubungan positif dengan kejadian gangguan kesehatan paru, sementara usia, jenis kelamin, kebiasaan merokok, masa kerja, penggunaan masker/APD dan kondisi lingkungan perlu dipertimbangkan sebagai faktor perancu.

Secara keseluruhan, pembahasan dari 10 penelitian menunjukkan bahwa temuan penelitian mengenai polusi asap kendaraan dan gangguan kesehatan paru memiliki dukungan empiris dan biologis yang cukup kuat, walaupun besarnya efek tidak selalu sama pada setiap populasi dan desain penelitian. Tinjauan sistematis besar mengenai paparan jangka panjang TRAP yang mencakup 353 penelitian juga menunjukkan tingkat keyakinan yang tinggi atau sedang-tinggi terhadap hubungan TRAP dengan beberapa outcome kesehatan, termasuk onset asma dan infeksi saluran pernapasan bawah pada anak.

KESIMPULAN

Berdasarkan sintesis 10 artikel ilmiah tahun 2023–2024, dapat disimpulkan bahwa polusi asap atau emisi kendaraan (*traffic-related air pollution*) merupakan faktor lingkungan yang berpotensi meningkatkan gangguan kesehatan paru, terutama melalui paparan PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, *black carbon*, dan diesel exhaust. Temuan penelitian menunjukkan bahwa paparan yang lebih tinggi berkaitan dengan penurunan fungsi paru seperti FEV₁, FVC, FEV₁/FVC dan MMEF serta peningkatan gejala respirasi seperti batuk, sesak napas dan wheezing. Bukti tersebut juga didukung oleh mekanisme biologis berupa inflamasi jalan napas, *oxidative stress* dan cedera epitel paru.

REFERENSI

1. Zhu X, Zhang Q, Du X, Jiang Y, Niu Y, Wei Y, et al. Respiratory effects of traffic-related air pollution: a randomized, crossover analysis of lung function, airway metabolome, and biomarkers of airway injury. *Environ Health Perspect.* 2023;131(5):057002. doi:10.1289/EHP11139.
2. Suhaimi NF, Jalaludin J, Roslan NIS. Traffic-related air pollution (TRAP) in relation to respiratory symptoms and lung function of school-aged children in Kuala Lumpur. *Int J Environ Health Res.* 2024;34(3):1384-1396. doi:10.1080/09603123.2023.2211020.
3. Pagdhune A, Kashyap R, SivaPerumal P, Balachandar R, Viramgami A, Sarkar K. Occupational exposure of vehicular emissions and cardiorespiratory risk among urban metropolitan bus drivers: a cross-sectional comparative study. *Work.* 2023;75(4):1309-1318. doi:10.3233/WOR-220189.
4. Ji N, Baptista A, Yu CH, Cepeda C, Green F, Greenberg M, et al. Traffic-related air pollution, chronic stress, and changes in exhaled nitric oxide and lung function among a panel of children with asthma living in an underresourced community. *Sci Total Environ.* 2024;912:168984. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.168984.
5. Almentero JE, Rico Hernández A, Soto H, García A, Toloza-Pérez YG, Malagón-Rojas JN. Assessing the influence of vehicular traffic-associated atmospheric pollutants on pulmonary function using spirometry and impulse oscillometry in healthy participants: insights from Bogotá, 2020-2021. *Atmosphere.* 2024;15(6):688. doi:10.3390/atmos15060688.
6. Lin TY, Makrufardi F, Tung NT, Manullang A, Chang PJ, et al. Different impacts of traffic-related air pollution on early-onset and late-onset asthma. [Journal details should be checked against the final publisher record before submission]. 2024.
7. Andrew Robinson, Ryan D. Huff, Min Hyung Ryu and Chris Carlsten, Variants in transient receptor potential channels and toll-like receptors modify airway responses to allergen and air pollution: a randomized controlled response human exposure study. *Respir Res.* 2023. doi:10.1186/s12931-023-02518-y.
8. Fang ZF, Wang ZN, Chen Z, Peng Y, Fu Y, Yang Y, et al. Fine particulate matter contributes to COPD-like pathophysiology: experimental evidence from rats exposed to diesel exhaust particles. *Respir Res.* 2024. doi:10.1186/s12931-023-02623-y.
9. Chaohui Mu, Qinghai Li, Yong Niu, Ting Hu, Yanting Li, Tao Wang, Xinjuan Yu, Yiqiao Lv, Huiling Tang. Chronic diesel exhaust exposure induced pulmonary vascular remodeling: a potential trajectory for traffic related pulmonary hypertension. *Respir Res.* 2024. doi:10.1186/s12931-024-02976-y.
10. Weatherly LM, Shane HL, Baur R, Lukomska E, McKinney W, Roberts JR, et al. Effects of inhaled tier-2 diesel engine exhaust on immunotoxicity in a rat model: a hazard identification study. Part II. Immunotoxicology. *Inhal Toxicol.* 2024.
11. Suhaimi, N. F., Jalaludin, J., & Roslan, N. I. S. Traffic-Related Air Pollution (TRAP) in relation to respiratory symptoms and lung function of school-aged children in Kuala Lumpur. *International Journal of Environmental Health Research*, 2024. 34(3), 1384–1396. DOI: 10.1080/09603123.2023.2211020.
12. Pagdhune, A., Kashyap, R., SivaPerumal, P., Balachandar, R., Viramgami, A., & Sarkar, K. Occupational exposure of vehicular emissions and cardiorespiratory risk among urban metropolitan bus drivers: A cross-sectional comparative study. 2023. *Work*, 75(4), 1309–1318. DOI: 10.3233/WOR-220189.
13. Ji, N., et al. Traffic-related air pollution, chronic stress, and changes in exhaled nitric oxide and lung function among a panel of children with asthma living in an underresourced community. *Science of the Total Environment*, 2024. 912, 168984. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168984.
14. Almentero, J. E., Rico Hernández, A., Soto, H., García, A., Toloza-Pérez, Y. G., & Malagón-Rojas, J. N. Assessing the Influence of Vehicular Traffic-Associated Atmospheric Pollutants

- on Pulmonary Function Using Spirometry and Impulse Oscillometry in Healthy Participants: Insights from Bogotá, 2020–2021. *Atmosphere*, 2024. 15(6), 688. DOI: 10.3390/atmos15060688.
15. H Boogaard, A P Patton, R W Atkinson, J R Brook, H H Chang, D L Crouse, J C Fussell, G Hoek, B Hoffmann, R Kappeler, M Kutlar Joss, M Ondras, S K Sagiv, E Samoli, R Shaikh, A Smargiassi, A A Szpiro, E D S Van Vliet, D Vienneau, J Weuve, F W Lurmann, F Forastiere. Health Effects Institute. Long-term exposure to traffic-related air pollution and selected health outcomes: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*. DOI: 10.1016/j.envint.2022.107262.
16. World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. [WHO Global Air Quality Guidelines](#)
17. Hou, T., Zhu, L., Wang, Y., & Peng, L. Oxidative stress is the pivot for PM2.5-induced lung injury. *Food and Chemical Toxicology*, 2023.183, 114362. DOI: 10.1016/j.fct.2023.114362.
18. Zhu, X., et al. Respiratory Effects of Traffic-Related Air Pollution: A Randomized, Crossover Analysis of Lung Function, Airway Metabolome, and Biomarkers of Airway Injury. *Environmental Health Perspectives*, 2023. 131(5), 057002. DOI: 10.1289/EHP11139.
19. Long, E., Rider, C. F., & Carlsten, C. Controlled human exposures: a review and comparison of the health effects of diesel exhaust and wood smoke. *Particle and Fibre Toxicology*, 2024.21, 44. DOI: 10.1186/s12989-024-00603-8.
20. Debelu, D., Mengistu, D. A., Aschalew, A., Mengistie, B., & Deriba, W. Global Public Health Implications of Traffic Related Air Pollution: Systematic Review. *Environmental Health Insights*, 2024.18. DOI: 10.1177/11786302241272403.