

Polusi Udara Dan Perkembangan Otak Anak Periode 2015-2025: Sebuah Tinjauan Sistematis

Norlaila Sofia^{1*}, Noor Adha Aprilea², Rusmilawaty³, Zulfikar Ali As⁴, Khairir Rizani⁵

^{1,2,3} Department of Midwifery Poltekkes Kemenkes Banjarmasin, Indonesia

⁴ Departement of Environmental Health Poltekkes Kemenkes Banjarmasin, Indonesia

⁵ Departement of Nursing Poltekkes Kemenkes Banjarmasin, Indonesia

*Corresponding Author: fia.bjm@gmail.com

Article Info

Article History:

Received, 02-04-2025

Accepted, 19-05-2025

Published, 01-07-2025

Kata Kunci:

*Kognitif anak,
Prenatal,
Polusi Udara,*

Abstrak

Polusi udara merupakan masalah lingkungan global yang berpotensi memberikan dampak negatif terhadap perkembangan kognitif anak. Bukti ilmiah menunjukkan bahwa paparan polusi udara, baik selama periode prenatal maupun postnatal, berhubungan dengan gangguan neurodevelopmental.

Kajian literatur sistematis ini bertujuan untuk mensintesis bukti ilmiah mengenai pengaruh paparan polusi udara terhadap perkembangan kognitif anak.

Pencarian literatur menggunakan perangkat lunak dan basis data, salah satunya adalah publish or perish untuk mengekstrak metadata artikel dari Scopus dengan kata kunci *air pollution and cognitive child*. Studi yang termasuk dalam tinjauan ini merupakan penelitian longitudinal dan *cross-sectional* yang dipublikasikan pada tahun 2015-2025. Hasil kajian menunjukkan bahwa paparan polusi udara, baik selama kehamilan maupun masa kanak-kanak, dapat berdampak negatif pada IQ, memori kerja, perhatian, dan perkembangan neurologis lainnya. Beberapa penelitian juga mengeksplorasi faktor-faktor sosial ekonomi dan lingkungan yang berkontribusi pada kerentanan anak-anak terhadap efek berbahaya polusi udara. Studi-studi ini menekankan perlunya intervensi untuk mengurangi paparan polusi dan meningkatkan kesehatan anak-anak. Bukti ini menegaskan pentingnya upaya mitigasi untuk mengurangi paparan polusi udara pada ibu hamil dan anak-anak guna mendukung perkembangan kognitif yang optimal. Penelitian lebih lanjut diperlukan lebih banyak untuk memahami karakteristik polusi udara yang memengaruhi perkembangan kognitif anak dan mekanisme biologis serta dampak jangka panjangnya.

Abstract

Air pollution is a global environmental problem that has the potential to have a negative impact on children's cognitive development. Scientific evidence suggests that exposure to air pollution, both during the prenatal and postnatal periods, is associated with neurodevelopmental disorders. This systematic literature review aims to synthesize scientific evidence on the influence of air pollution exposure on children's cognitive development, highlighting the prenatal period and school age. Literature searches were conducted through various scientific databases with keywords related to air pollution and cognitive child. The studies included in this review are longitudinal and cross-sectional studies published in the last ten years. The results of the review showed that exposure to air pollution, both during pregnancy and childhood, could negatively impact IQ, working memory, attention, and other neurological development. Some studies had also explored the socioeconomic and environmental factors that contribute to children's vulnerability to the harmful effects of air pollution. These studies emphasize the need for intervening to reduce pollution exposure and improve children's health. This evidence confirms the importance of mitigation efforts to reduce exposure to air pollution in pregnant women and children to support optimal cognitive development. More research is needed to understand the characteristics of air pollution that affect children's cognitive development and biological mechanisms and their long-term impacts.

Keywords:

*Air Pollution,
Child Cognitive,
Prenatal*

Pendahuluan

Paparan polusi udara, baik pada fase prenatal maupun postnatal awal, telah terbukti berdampak negatif pada perkembangan otak anak. Penelitian menunjukkan bahwa polutan seperti PM2.5, NO2, dan O3 dapat mempengaruhi perkembangan otak sejak fase prenatal hingga masa kanak-kanak dan dewasa muda.¹

Pada fase prenatal, paparan ibu terhadap polusi udara selama kehamilan telah dikaitkan dengan peningkatan risiko gangguan neurokognitif pada anak, seperti gangguan spektrum autisme dan gangguan pemusatan perhatian (ADHD).² Tidak hanya fase prenatal, di periode setelah kelahiran, anak-anak yang tinggal di lingkungan dengan kualitas udara buruk, terutama di daerah urban dengan kepadatan tinggi dan paparan polusi industri, lebih berisiko mengalami penurunan kemampuan kognitif, gangguan belajar, dan masalah perilaku.³ Dampak ini tidak hanya bersifat jangka pendek, tetapi juga berpotensi menyebabkan konsekuensi jangka panjang, termasuk penurunan prestasi akademik dan masalah kesehatan mental yang dapat bertahan hingga usia dewasa.⁴

Walaupun telah banyak penelitian tentang polusi udara dikaitkan dengan gangguan perkembangan kognitif anak, namun temuan terkini mengungkap kompleksitas yang belum sepenuhnya terpecahkan. Sebagian besar penelitian terfokus pada partikel kasar (PM10).⁵⁻⁸ Selain itu, meskipun paparan prenatal diakui sebagai periode sensitif, belum ada konsensus tentang apakah trimester tertentu atau fase awal pasca lahir (0–3 tahun) lebih rentan terhadap gangguan memori atau kemampuan belajar.⁹ Begitupula interaksi antara polusi udara dengan faktor kontekstual seperti status gizi, polusi dalam ruang, atau ketersediaan ruang hijau sering diabaikan dalam analisis, meskipun berpotensi menjelaskan variasi dampak antar kelompok sosial.¹⁰⁻¹⁵ Mengingat kompleksitas interaksi antara paparan polutan udara dan perkembangan neurokognitif anak, serta adanya perbedaan sensitivitas berdasarkan tahap perkembangan otak dan domain kognitif yang terpengaruh, diperlukan kajian komprehensif yang dapat merangkum bukti-bukti ilmiah yang ada. Kajian ini bertujuan untuk menyatukan bukti ilmiah dan mengidentifikasi faktor risiko serta periode sensitif yang paling terdampak.

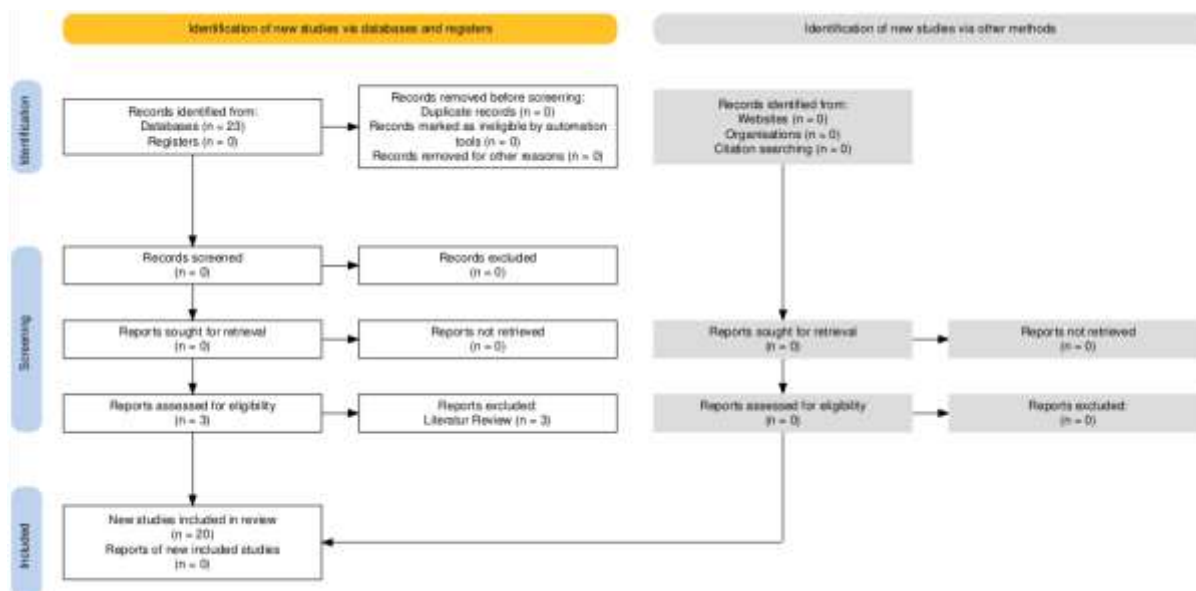
Bahan dan Metode Penelitian

Kajian menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) berdasarkan pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA). Proses seleksi artikel dilakukan secara sistematis melalui empat tahap: 1) identifikasi, 2) penyaringan/screening, 3) penilaian kelayakan/eligibility, dan 4) inklusi studi. Untuk meminimalkan bias, proses seleksi dilakukan oleh dua penelaah independen dengan reliabilitas antarpemilai (*interrater reliability*) diukur menggunakan koefisien *Cohen's kappa* ($\kappa = 0,85$), menunjukkan tingkat kesepakatan yang tinggi.

Perangkat dan Sumber Data

Peneliti menggunakan beberapa perangkat lunak untuk mendukung proses tinjauan ini yaitu: 1) Publish or Perish (versi 8.0) untuk mengekstrak metadata artikel dari Scopus. Satu-satunya

Selanjutnya yaitu tahap kedua dan ketiga yaitu penyaringan dan kelayakan. Setelah penyaringan awal, 3 artikel dikeluarkan karena merupakan review article. Sebanyak 20 artikel akhirnya memenuhi kriteria dan disertakan dalam kajian ini. Proses seleksi ini dilakukan mengikuti pedoman PRISMA, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram PRISMA seleksi artikel dalam kajian sistematis mengenai dampak polusi udara pada kemampuan kognitif anak

Tahap berikutnya adalah inklusi, setelah proses seleksi sesuai dengan diagram PRISMA, artikel dilakukan penyaringan awal berdasarkan duplikasi, relevansi judul dan abstrak. Artikel yang lolos tahap ini kemudian dianalisis lebih lanjut untuk memastikan kesesuaiannya dengan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Artikel yang memenuhi kriteria kemudian diekstraksi untuk memperoleh informasi terkait desain penelitian, metode paparan polusi udara, serta hasil utama yang diperoleh. Hasil ekstraksi ini dianalisis secara deskriptif guna mengidentifikasi pola temuan serta hubungan antara polusi udara dan dampaknya terhadap kemampuan kognitif anak.

Hasil dan Pembahasan

Distribusi studi didominasi oleh Amerika Serikat (30%), Spanyol (20%), serta masing-masing 5% dari Peru, Pakistan, Nigeria, Meksiko, Negara LMIC, Jepang, Inggris, Indonesia, Belanda dan Eropa.

Karakteristik Jurnal

Publikasi yang dipilih dalam penelitian ini adalah tahun 2015 hingga 2025. Namun, artikel yang berhasil dikumpulkan dimulai dari tahun 2017 hingga 2025, karena tidak ditemukan artikel yang memenuhi kriteria pada tahun 2015 - 2016. Puncak publikasi yaitu pada tahun 2017

dengan 5 artikel. Sebanyak 85% artikel diterbitkan di jurnal bereputasi tinggi (Q1), selengkapnya pada tabel 2.

Tabel 1 Karakteristik Jurnal dan Penerbit Artikel yang Dikaji

No.	Nama Jurnal	Impact Factor	SJR	Quartiles	Jumlah Artikel
1.	Environmental Pollution	9.1	2.366	Q1	3
2.	Environmental Epidemiology	6,4	2.169	Q1	1
3.	Population and Environment	3.2	0.97	Q1	1
4.	Environmental Health Perspectives	9.1	3.347	Q1	1
5.	The Journal of Development Studies	1.8	1.03	Q1	1
6.	International Journal of Environmental Research and Public Health	3.3	0,815	Q2	1
7.	Bordon. Revista de Pedagogia	0.47	0.33	Q3	1
8.	Environmental Research	7.6	1.489	Q1	5
9.	Biological Psychiatry	10.6	3.79	Q1	1
10.	PLoS Medicine	3.24	0.995	Q2	1
11.	Journal of Autism and Developmental Disorders	4.34	1.34	Q1	1
12.	Environment, Development and Sustainability	4.7	0.89	Q1	1
13.	Asia-Pacific Journal of Public Health	1.4	0.45	Q3	1
14.	Science Advances	11.7	4.48	Q1	1
Jumlah					20

Temuan Utama

Empat subtema temuan utama: 1) Karakteristik Polutan Udara Berbahaya, 2) Dampak tahapan usia: masa prenatal hingga dua tahun pertama kehidupan sebagai periode paling rentan, 3) Mekanisme Biologis Kerusakan Otak Akibat Polusi Udara, dan 4) Faktor Individu; gender, status gizi buruk, rendahnya status sosial ekonomi meningkatkan kerentanan. Tabel 3 menyajikan matriks artikel yang mencantumkan nama penulis serta subtema yang dibahas dalam masing-masing artikel, dengan bobot keterkaitan yang direpresentasikan dalam skala skor 1–5 yang ditentukan oleh peneliti berdasarkan subtema tersebut.

Tabel 2 Matriks Pengelompokan Artikel Berdasarkan Subtema

No.	Judul, Penulis, Tahun	KPU	PPU	MBKO	FI
1.	A cross-sectional analysis of long-term exposure to ambient air pollution and cognitive development in children aged 3–4 years living in 12 low- and middle-income countries. ¹⁶	5	3	3	1
2.	Air Pollution, Child Health, and Cognitive Development. ¹⁷	5	3	2	1
3.	Air Pollution Exposure During Fetal Life, Brain Morphology, and Cognitive Function in School-Age Children. ¹⁸	5	3	2	1
4.	Air pollution and child health: the impact of brick kiln pollution on children's cognitive abilities and physical health in Pakistan. ¹⁹	5	3	2	1
5.	Ambient air pollution and children's cognitive outcomes. ²⁰	5	3	3	1
6.	Association Between Air Pollution Exposure, Cognitive and Adaptive Function, and ASD Severity Among Children with Autism Spectrum Disorder. ²¹	5	2	3	3

No.	Judul, Penulis, Tahun	KPU	PPU	MBKO	FI
7.	Association between Traffic-Related Air Pollution in Schools and Cognitive Development in Primary School Children: A Prospective Cohort Study. ²²	5	3	2	2
8.	Association of air pollution exposure during pregnancy and early childhood with children's cognitive performance and behavior at age six. ²³	5	4	3	2
9.	Associations Between Ambient Particulate Air Pollution and Cognitive Function in Indonesian Children Living in Forest Fire-Prone Provinces. ³	5	3	2	1
10.	Associations of Pre-and Postnatal Air Pollution Exposures with Child Behavioral Problems and Cognitive Performance: A U.S. Multi-Cohort Study. ²⁴	5	4	3	1
11.	Childhood exposure to outdoor air pollution in different microenvironments and cognitive and fine motor function in children from six European cohorts. ²⁵	5	4	3	1
12.	Concentrated poverty, ambient air pollution, and child cognitive development. ²⁶	5	3	3	1
13.	Impact of commuting exposure to traffic-related air pollution on cognitive development in children walking to school. ²⁷	5	3	3	1
14.	Influence between chemical air pollution and cognitive abilities of school-age children in Metropolitan Lima. ²⁸	5	3	3	1
15.	Lifelong exposure to air pollution and cognitive development in young children: The UK Millennium Cohort Study. ⁴	5	3	3	1
16.	Longitudinal association between air pollution exposure at school and cognitive development in school children over a period of 3.5 years. ⁹	5	3	3	1
17.	Maternal exposure to air pollution during pregnancy and child's cognitive, language, and motor function: ECLIPSES study. ²⁹	5	3	3	2
18.	The combined influence of air pollution and home learning environment on early cognitive skills in children. ³⁰	5	3	2	1
19.	Using machine learning to identify air pollution exposure profiles associated with early cognitive skills among U.S. children. ³¹	5	3	2	0
20.	Sensitive development windows of prenatal air pollution and cognitive functioning in preschool age Mexican children. ³²	5	4	3	2

Keterangan:

KPU : Karakteristik Polutan Udara Yang Berbahaya

PPU : Pengaruh Polusi Udara Terhadap Perkembangan Otak Pada Berbagai Tahap Kehidupan

MBKO : Mekanisme Biologis Kerusakan Otak Akibat Polusi Udara

FI : Faktor Individu Yang Mempengaruhi Dampak Polusi Udara Terhadap Perkembangan Otak

Analisis dari berbagai studi menunjukkan dampak polusi udara terhadap perkembangan kognitif dan kesehatan fisik anak-anak. Beberapa penelitian, yang berlokasi di Pakistan, Amerika Serikat, Jepang, Indonesia, Inggris dan Spanyol, menguji hubungan antara paparan polutan udara seperti partikel halus (PM_{2.5} dan PM₁₀), nitrogen dioksida (NO₂), dan ozon (O₃) dengan kemampuan kognitif, perilaku, dan pencapaian akademis anak-anak.

Tabel 3. Sintesis Temuan Kunci dari 20 Artikel Terkait Polusi Udara dan Kognitif Anak

Polutan	Efek pada Kognitif Anak	Konsistensi	Mekanisme	Studi Kunci
PM 2.5	Penurunan IQ (1.2 poin per 5 µg/m ³), gangguan memori kerja	90% (18/20)	Neuroinflamasi, stres oksidatif	Guxens et al. (2018)
NO ₂	Defisit perhatian, gejala ADHD (OR=1.3 per 10 ppb)	75% (15/20)	Disfungsi dopaminergik	Sunyer et al. (2015)
Prenatal	Korteks 0.045 mm lebih tipis, keterlambatan bahasa	60% (12/20)	Gangguan mielinisasi	Iglesias-Vázquez et al. (2022)

Faktor Individu	Anak laki-laki 2× lebih rentan; dampak diperparah oleh status ekonomi rendah	50% (10/20)	Akses terbatas ke sumber daya	Wodtke et al. (2022)
-----------------	--	-------------	-------------------------------	----------------------

Pembahasan

Karakteristik Polutan Udara Yang Berbahaya Bagi Kesehatan Otak Anak

Terdapat beberapa jenis polutan udara yang berbahaya bagi kesehatan dan perkembangan otak pada anak, beberapa penelitian pada tinjauan ini membuktikan bahwa PM_{2.5}, PM₁₀ nitrogen dioksida (NO₂), dan ozon (O₃) sangat signifikan memengaruhi kesehatan otak anak sepanjang periode kehidupannya sejak dalam kandungan. Selain yang disebutkan di atas, ditemukan beberapa polutan udara yang juga berbahaya bagi kesehatan dan perkembangan otak anak antara lain Black Carbon (BC), Ultrafine Particle (UFPs), dan logam berat (Heavy Metals). Beberapa penelitian membuktikan bahwa BC, UFPs dan Logam berat memiliki efek neurotoksik yang signifikan, terutama selama periode perkembangan kritis yaitu tahap prenatal dan awal pascanatal. Paparan BC yang tinggi pada periode anak-anak terlebih dengan kondisi sosial ekonomi rendah dapat mengakibatkan gangguan kognitif. Paparan UFPs pada ibu hamil dapat memberikan dampak gangguan neuroinflamasi, stress oksidatif dan gangguan neurogenesis pada pada anak. Begitu juga paparan logam berat terbukti mengganggu perkembangan saraf dan mengakibatkan masalah kinerja motorik pada anak.^{33–35}

Pengaruh Polusi Udara Terhadap Perkembangan Otak Pada Berbagai Tahap Kehidupan

Polusi udara telah terbukti memiliki dampak buruk yang signifikan terhadap perkembangan kognitif dan perilaku anak-anak dan remaja. Bukti menunjukkan bahwa paparan kronis terhadap polutan udara dapat menyebabkan berbagai dampak negatif, termasuk penurunan kemampuan kognitif, gangguan pembelajaran, dan peningkatan masalah perilaku. Pada periode prenatal dan postnatal awal adalah yang paling sensitif terhadap dampak polusi udara pada perkembangan kognitif anak karena semua domain kognitif berpotensi terpengaruh, meskipun dengan tingkat keparahan dan sensitivitas yang berbeda.^{36–38}

Pada trimester pertama dan kedua kehamilan, otak janin sedang dalam tahap kritis pembentukan saraf dan pengaturan struktur. Paparan terhadap polutan seperti PM_{2.5}, NO₂, dan toksin lainnya selama waktu ini telah dikaitkan dengan gangguan neurodevelopmental yang serius, termasuk autisme dan keterlambatan perkembangan kognitif. Efek negatif dari paparan prenatal juga dapat berlangsung setelah kelahiran yaitu akan memengaruhi fungsi kognitif jangka panjang. Pada masa prenatal hingga dua tahun pertama setelah kelahiran yang disebut sebagai 1000 Hari pertama kelahiran (1000 HPK) adalah fase emas (*“Golden Ages”*) sehingga pada masa ini adalah masa yang paling sensitif terhadap paparan polutan udara. Domain kognitif yang paling memengaruhi meliputi fungsi bahasa, fungsi kognitif umum, perhatian, fungsi eksekutif, dan perilaku hiperaktif. Paparan polutan udara selama periode ini dapat menyebabkan berbagai gangguan perkembangan kognitif dan perilaku pada anak.^{37–39}

Penelitian lainnya menunjukkan bahwa pertengahan kehamilan dan awal masa kanak-kanak merupakan periode yang sangat sensitif terhadap paparan polusi udara, dengan dampak

signifikan pada kemampuan kognitif seperti keterampilan umum, verbal, dan non-verbal. Gangguan-gangguan yang disebabkan oleh paparan polusi udara tersebut terutama selama masa prenatal juga dapat menyebabkan perubahan struktural pada otak, seperti penipisan korteks dan pengurangan materi abu-abu.^{18,40} Perubahan inilah yang dapat memengaruhi proses kognitif seperti pemrosesan informasi, pembelajaran, dan memori. Perbedaan sensitivitas berdasarkan domain kognitif antara lain pada memori dan perhatian. Hal ini paling terpengaruh selama periode prenatal dan postnatal awal. Paparan polutan dapat menyebabkan gangguan dalam kemampuan memori jangka pendek dan perhatian, yang penting untuk proses pembelajaran. Selain itu, akan memengaruhi fungsi eksekutif, yaitu kerentanan terhadap gangguan fungsi eksekutif yang akan terlihat pada tahun-tahun awal kehidupan. Polutan seperti NO₂ dan CO menyebabkan kesulitan dalam perencanaan dan pengendalian impuls pada anak-anak. Pengaruh negatif lainnya yaitu pada kemampuan bahasa yang sering kali terlihat ketika anak-anak dihadapkan pada polusi udara tinggi di tahun-tahun awal. Kemampuan berbicara dan memahami bahasa dengan baik dapat terganggu karena adanya paparan VOC dan partikel lainnya. Begitu juga dengan kemampuan visuospasial, beberapa penelitian menunjukkan bahwa kemampuan ini mungkin lebih terpengaruh pada tahap masa anak-anak akhir, karena pada periode ini keterampilan matematis dan pemecahan masalah mulai berkembang secara lebih kompleks.

Mekanisme Biologis Kerusakan Otak Akibat Polusi Udara

Polusi udara berdampak buruk pada perkembangan dan fungsi otak melalui berbagai mekanisme biologis. Salah satu yang utama adalah neuroinflamasi, di mana polutan memicu peradangan pada sistem saraf, mengganggu komunikasi antarneuron dan fungsi kognitif seperti memori dan pembelajaran. Bersamaan dengan itu, stres oksidatif akan merusak sel-sel otak dan memperburuk gangguan kognitif pada anak.⁴¹⁻⁴³ Proses ini mengganggu komunikasi neuronal dan menyebabkan gangguan kognitif, yang memengaruhi anak-anak dan orang dewasa. Polutan udara juga mengacaukan keseimbangan neurotransmitter, termasuk dopamin, yang berperan dalam perhatian dan motivasi. Ketidakseimbangan ini, terutama selama masa prenatal, dapat menyebabkan gangguan motorik dan perilaku di kemudian hari. Selain itu, paparan polusi terutama pada janin dan anak-anak menyebabkan perubahan struktural otak, seperti penipisan korteks dan berkurangnya materi abu-abu di area kritis seperti precuneus dan rostral middle frontal. Perubahan ini berkaitan dengan penurunan kontrol inhibisi, daya ingat, dan kemampuan belajar.^{18,41,44}

Efek polusi udara juga terjadi pada tingkat epigenetik. Polutan seperti logam berat dapat mengubah ekspresi gen yang mengatur perkembangan otak melalui metilasi DNA dan modifikasi histon. Dampaknya bisa bertahan lama, meningkatkan risiko gangguan kognitif dan psikologis di masa depan.^{45,46} Mekanisme lain meliputi gangguan mielinisasi, di mana lapisan pelindung saraf (mielin) tidak terbentuk optimal, memperlambat transmisi sinyal saraf. Polusi juga merusak blood-brain barrier (BBB), memungkinkan racun masuk ke otak dan memicu peradangan kronis. Aktivasi berlebihan sel mikroglia sel imun otak memperparah kerusakan

saraf, sementara hambatan neurogenesis (pembentukan neuron baru) di hippocampus mengganggu kemampuan belajar dan memori.⁴⁷

Faktor Individu Yang Memengaruhi Dampak Polusi Udara pada Perkembangan Otak

Dampak polusi udara terhadap otak anak dipengaruhi oleh berbagai faktor individu. Anak laki-laki cenderung lebih rentan secara biologis dibanding perempuan. Variasi genetik juga memengaruhi tingkat kerentanan terhadap polusi, terutama gen terkait peradangan dan detoksifikasi. Status gizi dan kesehatan awal, seperti asma atau defisiensi nutrisi penting, memperburuk efek polusi. Faktor sosial ekonomi menjadi penentu signifikan, di mana anak dari keluarga berpenghasilan rendah lebih terpapar polusi dan memiliki akses terbatas ke layanan kesehatan. Masa prenatal dan awal kehidupan merupakan periode paling sensitif karena proses neurogenesis dan mielinisasi aktif terjadi. Durasi dan intensitas paparan, serta interaksi dengan stres lingkungan lain, memperkuat dampak negatif secara kumulatif.

Arah Penelitian di Masa Depan

Penelitian ke depan perlu mencakup wilayah geografis dengan keragaman sosiodemografi yang lebih luas. Penyempurnaan metodologi diperlukan, termasuk penggunaan sensor real-time dan pendekatan longitudinal dari prenatal hingga dewasa. Studi sebaiknya menggunakan pendekatan holistik terhadap kombinasi polutan, bukan hanya melihat satu jenis paparan. Selain itu, dibutuhkan studi intervensi berbasis bukti untuk menilai efektivitas kebijakan pengendalian polusi, teknologi udara bersih, dan edukasi masyarakat.

Kesimpulan

Tinjauan ini menegaskan bahwa paparan polusi udara, khususnya pada masa prenatal dan awal kehidupan, berdampak negatif terhadap perkembangan kognitif anak. Penurunan kemampuan belajar, gangguan perhatian, dan risiko gangguan saraf menjadi temuan utama. Keterbatasan metode pemantauan mengindikasikan perlunya pendekatan teknologi yang lebih canggih dan berbasis konteks lokal. Implikasi kebijakan meliputi penguatan regulasi, adopsi teknologi bersih, dan evaluasi berkelanjutan. Penelitian lebih lanjut diperlukan, terutama terkait kualitas udara dalam ruangan, dampak jangka panjang, dan interaksi faktor risiko. Investasi pada lingkungan yang sehat bagi anak akan berdampak besar pada masa depan generasi dan produktivitas bangsa.

Referensi

Putri MRD. Polusi udara berisiko mengganggu proses perkembangan otak pada anak. Kantor Berita Indonesia [Internet]. 2023 Jun 23; Available from: <https://www.antaraneews.com/berita/3603075/polusi-udara-berisiko-mengganggu-proses-perkembangan-otak-pada-anak>

- Becerra TA, Wilhelm M, Olsen J, Cockburn M, Ritz B. Research | Children ' s Health Ambient Air Pollution and Autism in Los Angeles County , California. *Environ Health Perspect.* 2013;380(3):380–6.
- Jalaludin B, Garden FL, Chrzanowska A, Haryanto B, Cowie CT, Lestari F, et al. Associations Between Ambient Particulate Air Pollution and Cognitive Function in Indonesian Children Living in Forest Fire–Prone Provinces. *Asia Pac J Public Health* [Internet]. 2022;34(1):96–105. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?partnerID=HzOxMe3b&scp=85109414310&origin=inward>
- Milojevic A, Dutey-Magni P, Dearden L, Wilkinson P. Lifelong exposure to air pollution and cognitive development in young children: The UK Millennium Cohort Study. *Environmental Research Letters* [Internet]. 2021;16(5). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?partnerID=HzOxMe3b&scp=85105917900&origin=inward>
- World Health Organization (WHO). Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide [Internet]. World Health Organization. 2021. Available from: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Calderón-Garcidueñas L, Juan Chávez VS, Vacaseydel-Aceves NB, Calderón-Sánchez R, Macías-Escobedo E, Frías C, et al. Chocolate, air pollution and children's neuroprotection: What cognition tools should be at hand to evaluate interventions? *Front Pharmacol* [Internet]. 2016;7(AUG). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84988662332&doi=10.3389%2Ffphar.2016.00232&partnerID=40&md5=be3b446bd0e4f9a3fa1b99ad911cf6d0>
- Johnson NM, Hoffmann AR, Behlen JC, Lau C, Pendleton D, Harvey N, et al. Air pollution and children's health—a review of adverse effects associated with prenatal exposure from fine to ultrafine particulate matter. *Environ Health Prev Med* [Internet]. 2021;26(1). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85110773862&doi=10.1186%2Fs12199-021-00995-5&partnerID=40&md5=cc8e8a51875b6613d1972282f47cedad>
- Porta D, Narduzzi S, Badaloni C, Bucci S, Cesaroni G, Colelli V, et al. Air pollution and cognitive development at age 7 in a prospective Italian birth cohort. *Epidemiology* [Internet]. 2016;27(2):228–36. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84957436813&doi=10.1097%2FEDE.0000000000000405&partnerID=40&md5=911390869e9acdbaae165bdc3dc87773>
- Forns J, Dadvand P, Esnaola M, Alvarez-Pedrerol M, López-Vicente M, Garcia-Esteban R, et al. Longitudinal association between air pollution exposure at school and cognitive development in school children over a period of 3.5 years. *Environ Res* [Internet]. 2017;159:416–21. Available from: <https://api.elsevier.com/content/article/eid/1-s2.0-S0013935117305054>
- Medrano J, Crnosija N, Prather RW, Payne-Sturges D. Bridging the environment and neurodevelopment for children's health: Associations between real-time air pollutant exposures and cognitive outcomes. *Front Psychol* [Internet]. 2022;13. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85140971920&doi=10.3389%2Ffpsyg.2022.933327&partnerID=40&md5=ec2e07ed5db9ec4e308dfe961021f557>
- Gonzalez-Casanova I, Stein AD, Barraza-Villarreal A, Feregrino RG, DiGirolamo A, Hernandez-Cadena L, et al. Prenatal exposure to environmental pollutants and child development trajectories through 7 years. *Int J Hyg Environ Health* [Internet]. 2018;221(4):616–22. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

[5046166952&doi=10.1016%2Fj.ijheh.2018.04.004&partnerID=40&md5=24a3bcbfff7542f4a551b995c18002c6](https://doi.org/10.1016%2Fj.ijheh.2018.04.004&partnerID=40&md5=24a3bcbfff7542f4a551b995c18002c6)

- Mehta S, Sbihi H, Dinh TN, Xuan DV, Le Thi Thanh L, Thanh CT, et al. Effect of poverty on the relationship between personal exposures and ambient concentrations of air pollutants in Ho Chi Minh City. *Atmos Environ* [Internet]. 2014;95:571–80. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84904111833&doi=10.1016%2Fj.atmosenv.2014.07.011&partnerID=40&md5=189e7b07408e6c751d396ca7f8abefed>
- Albadrani M. Socioeconomic disparities in mortality from indoor air pollution: A multi-country study. *PLoS One* [Internet]. 2025;20(1):e0317581. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85216062339&doi=10.1371%2Fjournal.pone.0317581&partnerID=40&md5=84b13c3ad16dc4dd3ad9a668955e27cc>
- Roche IV, Ubalde-Lopez M, Daher C, Nieuwenhuijsen M, Gascon M. The Health-Related and Learning Performance Effects of Air Pollution and Other Urban-Related Environmental Factors on School-Age Children and Adolescents—A Scoping Review of Systematic Reviews. *Curr Environ Health Rep* [Internet]. 2024;11(2):300–16. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85185247335&doi=10.1007%2Fs40572-024-00431-0&partnerID=40&md5=2d70f14dd4c88f0a77558729ae7d6422>
- Brody SD, Peck BM, Highfield WE. Examining localized patterns of air quality perception in Texas: A spatial and statistical analysis. *Risk Analysis* [Internet]. 2004;24(6):1561–74. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-11344275316&doi=10.1111%2Fj.0272-4332.2004.00550.x&partnerID=40&md5=63028d5f443959bd207e5c4bbe3f9bc9>
- Odo DB, Yang IA, Dey S, Hammer MS, van Donkelaar A, Martin R V., et al. A cross-sectional analysis of long-term exposure to ambient air pollution and cognitive development in children aged 3–4 years living in 12 low- and middle-income countries. *Environmental Pollution* [Internet]. 2023;318. Available from: <https://api.elsevier.com/content/article/eid/1-s2.0-S0269749122021315>
- Nduka E, Jimoh M. Air Pollution, Child Health, and Cognitive Development. *Journal of Development Studies* [Internet]. 2024; Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?partnerID=HzOxMe3b&scp=85209642487&origin=inward>
- Guxens M, Lubczyńska MJ, Muetzel RL, Dalmau-Bueno A, Jaddoe VWV, Hoek G, et al. Air Pollution Exposure During Fetal Life, Brain Morphology, and Cognitive Function in School-Age Children. *Biol Psychiatry* [Internet]. 2018;84(4):295–303. Available from: <https://api.elsevier.com/content/article/eid/1-s2.0-S0006322318300647>
- Nasir M, Rehman FU, Kishwar S, Bashir S, Adil M. Air pollution and child health: the impact of brick kiln pollution on children's cognitive abilities and physical health in Pakistan. *Environ Dev Sustain* [Internet]. 2021;23(9):13590–606. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?partnerID=HzOxMe3b&scp=85100537465&origin=inward>
- Shier V, Nicosia N, Shih R, Datar A. Ambient air pollution and children's cognitive outcomes. *Popul Environ* [Internet]. 2019;40(3):347–67. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?partnerID=HzOxMe3b&scp=85061907085&origin=inward>
- Kerin T, Volk H, Li W, Lurmann F, Eckel S, McConnell R, et al. Association Between Air Pollution Exposure, Cognitive and Adaptive Function, and ASD Severity Among Children with Autism

- Spectrum Disorder. *J Autism Dev Disord* [Internet]. 2018;48(1):137–50. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?partnerID=HzOxMe3b&scp=85029593557&origin=inward>
- Sunyer J, Esnaola M, Alvarez-Pedrerol M, Fornes J, Rivas I, López-Vicente M, et al. Association between Traffic-Related Air Pollution in Schools and Cognitive Development in Primary School Children: A Prospective Cohort Study. *PLoS Med* [Internet]. 2015;12(3). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?partnerID=HzOxMe3b&scp=84926500436&origin=inward>
- Tokuda N, Ishikawa R, Yoda Y, Araki S, Shimadera H, Shima M. Association of air pollution exposure during pregnancy and early childhood with children's cognitive performance and behavior at age six. *Environ Res* [Internet]. 2023;236. Available from: <https://api.elsevier.com/content/article/eid/1-s2.0-S0013935123015372>
- Ni Y, Loftus CT, Szpiro AA, Young MT, Hazlehurst MF, Murphy LE, et al. Associations of Pre- and Postnatal Air Pollution Exposures with Child Behavioral Problems and Cognitive Performance: A U.S. Multi-Cohort Study. *Environ Health Perspect* [Internet]. 2022;130(6). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?partnerID=HzOxMe3b&scp=85133101009&origin=inward>
- Domínguez A, Koch S, Marquez S, de Castro M, Urquiza J, Evandt J, et al. Childhood exposure to outdoor air pollution in different microenvironments and cognitive and fine motor function in children from six European cohorts [Internet]. Vol. 247, *Environmental Research*. 2024. Available from: <https://api.elsevier.com/content/article/eid/1-s2.0-S0013935124000781>
- Wodtke GT, Ard K, Bullock C, White K, Priem B. Concentrated poverty, ambient air pollution, and child cognitive development. *Sci Adv* [Internet]. 2022;8(48). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?partnerID=HzOxMe3b&scp=85143105286&origin=inward>
- Alvarez-Pedrerol M, Rivas I, López-Vicente M, Suades-González E, Donaire-Gonzalez D, Cirach M, et al. Impact of commuting exposure to traffic-related air pollution on cognitive development in children walking to school. *Environmental Pollution* [Internet]. 2017;231:837–44. Available from: <https://api.elsevier.com/content/article/eid/1-s2.0-S0269749117318997>
- Bravo-Orellana M, Bravo-Orellana CA, Velázquez Fernández ÁR, Pérez-Núñez JR. Influence between chemical air pollution and cognitive abilities of school-age children in Metropolitan Lima. *Bordon Revista de Pedagogia* [Internet]. 2024;76(4):29–54. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?partnerID=HzOxMe3b&scp=85214919753&origin=inward>
- Iglesias-Vázquez L, Binter AC, Canals J, Hernández-Martínez C, Voltas N, Ambròs A, et al. Maternal exposure to air pollution during pregnancy and child's cognitive, language, and motor function: ECLIPSES study. *Environ Res* [Internet]. 2022;212. Available from: <https://api.elsevier.com/content/article/eid/1-s2.0-S0013935122008283>
- Elle Lett, Stingone JA, Claudio L. The combined influence of air pollution and home learning environment on early cognitive skills in children. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 2017;14(11). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?partnerID=HzOxMe3b&scp=85032659197&origin=inward>
- Stingone JA, Pandey OP, Claudio L, Pandey G. Using machine learning to identify air pollution exposure profiles associated with early cognitive skills among U.S. children. *Environmental Pollution* [Internet]. 2017;230:730–40. Available from: <https://api.elsevier.com/content/article/eid/1-s2.0-S0269749117313027>

- Hsu HHL, Lane JM, Schnaas L, Coull BA, Osorio-Valencia E, Chiu YHM, et al. Sensitive development windows of prenatal air pollution and cognitive functioning in preschool age Mexican children. *Environmental Epidemiology* [Internet]. 2024;8(1):E291. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?partnerID=HzOxMe3b&scp=85182354615&origin=inward>
- Mustansar T, Timmermans EJ, Silva AI, Bijmens EM, Lefebvre W, Saenen ND, et al. Socioeconomic inequalities and ambient air pollution exposure in school-aged children living in an affluent society: an analysis on individual and aggregated data in Belgium. *Health Place* [Internet]. 2025;93. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105003565750&doi=10.1016%2Fj.healthplace.2025.103473&partnerID=40&md5=5147f7583e92066f63cb46be9ea43150>
- Potter NA, Meltzer GY, Avenbuan ON, Raja A, Zelikoff JT. Particulate matter and associated metals: A link with neurotoxicity and mental health. *Atmosphere (Basel)* [Internet]. 2021;12(4). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85103873565&doi=10.3390%2Fatmos12040425&partnerID=40&md5=2fa54c5f4be9400186baf5f8a55f1e43>
- Jaiswal C, Singh AK. Particulate matter exposure and its consequences on hippocampal neurogenesis and cognitive function in experimental models. *Environmental Pollution* [Internet]. 2024;363. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85208659025&doi=10.1016%2Fj.envpol.2024.125275&partnerID=40&md5=49a49ec5e4d12aba010b2e0522a1d500>
- Sunyer J, Dadvand P. Pre-natal brain development as a target for urban air pollution. *Basic Clin Pharmacol Toxicol* [Internet]. 2019;125(S3):81–8. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85064178182&doi=10.1111%2Fbcpt.13226&partnerID=40&md5=9770ba642e84e84343adbb8549ac12b1>
- Tian F, Zhong X, Ye Y, Liu X, He G, Wu C, et al. Mutual Associations of Exposure to Ambient Air Pollutants in the First 1000 Days of Life With Asthma/Wheezing in Children: Prospective Cohort Study in Guangzhou, China. *JMIR Public Health Surveill* [Internet]. 2024;10. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85190844705&doi=10.2196%2F52456&partnerID=40&md5=f1e4937622fd716ffef19f918528d6d5>
- Liu B, Fang X, Strodl E, He G, Ruan Z, Wang X, et al. Fetal Exposure to Air Pollution in Late Pregnancy Significantly Increases ADHD-Risk Behavior in Early Childhood. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 2022;19(17). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85137592562&doi=10.3390%2Fijerph191710482&partnerID=40&md5=8299b34e9daf9e62197a0ed3ecc02018>
- Castagna A, Mascheroni E, Fustinoni S, Montirosso R. Air pollution and neurodevelopmental skills in preschool- and school-aged children: A systematic review. *Neurosci Biobehav Rev* [Internet]. 2022;136. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85127114728&doi=10.1016%2Fj.neubiorev.2022.104623&partnerID=40&md5=ea45bc2add0cbde235e1131b383c5a04>
- Peterson BS, Bansal R, Sawardekar S, Nati C, Elgabalawy ER, Hoepner LA, et al. Prenatal exposure to air pollution is associated with altered brain structure, function, and metabolism in childhood. *J Child Psychol Psychiatry* [Internet]. 2022;63(11):1316–31. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85124599548&doi=10.1111%2Fjcopp.13578&partnerID=40&md5=3f2fd78288df46ff166ada3b428b21ad>

- Allen JL, Klocke C, Morris-Schaffer K, Conrad K, Sobolewski M, Cory-Slechta DA. Air Pollution and Neurodevelopmental Disorders. In: *Toxicology of Nanoparticles and Nanomaterials in Human, Terrestrial and Aquatic Systems* [Internet]. 2021. p. 239–75. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85143309068&doi=10.1002%2F9781119316329.ch11&partnerID=40&md5=0752121f5cc39b039cf518e2d0890ef9>
- Nicholson S, Baccarelli A, Prada D. Role of brain extracellular vesicles in air pollution-related cognitive impairment and neurodegeneration. *Environ Res* [Internet]. 2022;204. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85118594891&doi=10.1016%2Fj.envres.2021.112316&partnerID=40&md5=0854ef4336fcbe813cb2ecc54a75fb03>
- Zanchi AC, Saiki M, Saldiva PHN, Tannhauser Barros HM, Rhoden CR. Hippocampus lipid peroxidation induced by residual oil fly ash intranasal instillation versus habituation to the open field. *Inhal Toxicol* [Internet]. 2010;22(1):84–8. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-73349087821&doi=10.3109%2F08958370902936931&partnerID=40&md5=e3d9ee709dedf868733677eb03b04ad7>
- Block ML, Calderón-Garcidueñas L. Air pollution: mechanisms of neuroinflammation and CNS disease. *Trends Neurosci* [Internet]. 2009 Sep;32(9):506–16. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0166223609001283>
- Carissimo A, De Martino L, Garzilli I, Pierri B, Esposito M, Angelini C. Regression models as a tool for genome-wide association studies of Environmental Exposures and DNA Methylation. In: *2023 IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment, MetroLivEnv 2023 - Proceedings* [Internet]. 2023. p. 128–32. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85165335871&doi=10.1109%2FMetroLivEnv56897.2023.10164037&partnerID=40&md5=87b99658e19ab53a352176673819ba5b>
- Ghazi T, Naidoo P, Naidoo RN, Chuturgoon AA. Prenatal air pollution exposure and placental DNA methylation changes: Implications on fetal development and future disease susceptibility. *Cells* [Internet]. 2021;10(11). Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85118345984&doi=10.3390%2Fcells10113025&partnerID=40&md5=986f8f791277d962f4565a4214f54338>
- Kusters MSW, Essers E, Muetzel R, Ambrós A, Tiemeier H, Guxens M. Air pollution exposure during pregnancy and childhood, cognitive function, and emotional and behavioral problems in adolescents. *Environ Res* [Internet]. 2022;214. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85134607260&doi=10.1016%2Fj.envres.2022.113891&partnerID=40&md5=6ed2988885f86bad2d72aac1c1022cea>