



DAMPAK PENCEMARAN LINGKUNGAN TERHADAP KESEHATAN MASYARAKAT

Abdul Gafur^{✉1}, Eka Apriyanti^{2*}

^{1,2}Universitas Negeri Makassar,

Korespondensi : abdul_gafur@unm.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menyintesis secara sistematis bukti mengenai dampak pencemaran lingkungan terhadap kesehatan masyarakat, dengan perhatian khusus pada kelompok rentan, termasuk lanjut usia. Metode yang digunakan adalah systematic umbrella review terhadap tinjauan sistematis dan meta-analisis yang membahas paparan polutan udara, bahan kimia, logam berat, serta faktor lingkungan lainnya dan kaitannya dengan luaran kesehatan. Hasil kajian menunjukkan bahwa polusi udara merupakan paparan yang paling konsisten berhubungan dengan penyakit kardiovaskular, stroke, penyakit jantung iskemik, gangguan pernapasan, kanker, serta peningkatan mortalitas; hubungan tersebut cenderung lebih kuat pada kelompok lanjut usia dan individu dengan penyakit penyerta. Secara lebih luas, sintesis terdahulu menemukan 197 hubungan antara 69 paparan lingkungan dan 83 penyakit atau penyebab kematian, meskipun kekuatan asosiasi bervariasi antarjenis polutan, wilayah, dan kelompok populasi. Bukti mengenai paparan prenatal terhadap PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, CO, O₃, dan SO₂ juga menunjukkan keterkaitan dengan berat lahir rendah, kelahiran prematur, lahir mati, dan small-for-gestational-age berdasarkan 36 tinjauan sistematis yang mencakup 295 studi primer. Namun, interpretasi hasil masih dibatasi oleh heterogenitas desain penelitian, perbedaan metode pengukuran paparan, tumpang tindih studi primer, keterbatasan data dari negara berpendapatan rendah dan menengah, serta penerapan penilaian kualitas dan kepastian bukti yang belum konsisten. Kajian ini menegaskan bahwa pengendalian pencemaran perlu ditempatkan sebagai prioritas kesehatan masyarakat melalui pemantauan paparan yang lebih baik, perlindungan kelompok rentan, dan penelitian longitudinal yang lebih representatif secara geografis.

Kata Kunci: Pencemaran, lingkungan, kesehatan masyarakat

PENDAHULUAN

Peningkatan prevalensi penyakit yang berkaitan dengan kontaminasi lingkungan menegaskan bahwa pencemaran bukan hanya persoalan ekologis, melainkan determinan penting kesehatan masyarakat. Bukti global menunjukkan bahwa polusi masih berkontribusi terhadap sekitar sembilan juta kematian setiap tahun, sementara kematian akibat polutan modern, seperti polusi udara ambien dan bahan kimia toksik, terus meningkat terutama di negara berpendapatan rendah dan menengah (Fuller et al., 2022).

Kajian terdahulu memperlihatkan bahwa paparan lingkungan berhubungan dengan berbagai luaran kesehatan, termasuk penyakit pernapasan, kardiovaskular, kanker, gangguan perkembangan saraf, serta kematian. Suatu umbrella review mengidentifikasi 197 hubungan antara 69 jenis paparan lingkungan dan 83 penyakit atau penyebab kematian, dengan bukti terbanyak berkaitan dengan polusi udara, asap tembakau lingkungan, bahan kimia, dan logam berat (Rojas-Rueda et al., 2021).

Meskipun jumlah penelitian terus bertambah, temuan yang tersedia masih tersebar menurut jenis polutan, kelompok populasi, wilayah geografis, serta indikator kesehatan yang digunakan. Kesenjangan pengetahuan terutama tampak pada keterbatasan data dari negara berkembang, lemahnya

pemantauan paparan, dan kesulitan mengukur dampak paparan jangka panjang; kondisi tersebut dapat menyebabkan beban kesehatan yang sebenarnya kurang teridentifikasi (Shetty et al., 2023).

Selain ketimpangan ketersediaan data, perkembangan studi sebelumnya menunjukkan adanya persoalan metodologis dalam sintesis bukti lingkungan. Tinjauan sistematis di bidang kesehatan lingkungan belum selalu menerapkan protokol terdahulu, pernyataan Population–Exposure–Comparator–Outcome yang lengkap, maupun metode penilaian kepastian bukti secara konsisten (Menon et al., 2022). Heterogenitas desain penelitian, metode pengukuran paparan, dan karakteristik populasi juga dapat menyulitkan perbandingan hasil serta meningkatkan ketidakpastian dalam penarikan kesimpulan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, kajian ini bertujuan menyintesis secara sistematis bukti mengenai hubungan antara pencemaran lingkungan dan kesehatan masyarakat, sekaligus mengidentifikasi pola temuan, kelompok rentan, kesenjangan metodologis, dan arah penelitian mendatang. Pertanyaan penelitian yang diajukan adalah: jenis polutan apa yang paling konsisten dikaitkan dengan gangguan kesehatan; luaran kesehatan apa yang paling sering dilaporkan; kelompok masyarakat dan wilayah mana yang paling rentan; serta faktor metodologis apa yang membatasi interpretasi dan penerapan hasil penelitian terdahulu?

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan desain systematic umbrella review untuk mengevaluasi secara komprehensif bukti epidemiologis yang ada, dengan mengadopsi protokol terstruktur yang didaftarkan sebelumnya guna menjamin transparansi dan keterulangan proses; penggunaan protokol prapublikasi juga penting untuk memperjelas tujuan, kriteria, dan prosedur kajian sejak awal (Menon et al., 2022). Tahapan penelitian meliputi perumusan pertanyaan berdasarkan kerangka populasi–paparan–pembanding–luaran, penyusunan strategi pencarian yang komprehensif, penelusuran basis data ilmiah, penghapusan duplikasi, penyaringan judul dan abstrak, serta pemeriksaan teks lengkap berdasarkan kriteria seleksi yang telah ditetapkan. Selanjutnya, data mengenai karakteristik tinjauan, jenis polutan, populasi, luaran kesehatan, ukuran efek, dan hasil utama diekstraksi menggunakan formulir terstruktur, kemudian kualitas metodologis tinjauan yang disertakan dan kepastian buktinya dinilai secara sistematis. Proses pelaporan mengikuti prinsip PRISMA 2020, termasuk penyajian alasan penelitian, metode identifikasi dan seleksi sumber, penilaian bukti, serta alur studi dalam diagram yang memungkinkan proses kajian ditelusuri dan direplikasi (Page et al., 2021). Hasil akhirnya disintesis secara naratif dengan membandingkan konsistensi asosiasi, variasi antarwilayah dan kelompok populasi, potensi tumpang tindih studi primer, serta sumber heterogenitas dan bias metodologis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Literatur yang dianalisis terutama terdiri atas tinjauan sistematis dan meta-analisis mengenai paparan polutan udara ambien selama kehamilan serta dampaknya terhadap kesehatan janin dan bayi baru lahir. Polutan yang paling sering dikaji meliputi PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, CO, O₃, dan SO₂, sedangkan luaran yang dominan adalah berat lahir, berat lahir rendah, kelahiran prematur, lahir mati, dan small-for-gestational-age (Nyadanu et al., 2022). Berdasarkan sintesis terhadap 36 tinjauan sistematis, literatur tersebut mencakup 295 studi primer, dengan sebagian besar menggunakan desain observasional berbasis populasi dan pengukuran paparan melalui data pemantauan rutin atau model estimasi spasial (Nyadanu et al., 2022). Secara metodologis, penelitian menunjukkan kecenderungan menggunakan analisis paparan selama seluruh masa kehamilan dan berdasarkan trimester, tetapi perbedaan definisi luaran, metode estimasi paparan, karakteristik populasi, serta penyesuaian faktor perancu menghasilkan heterogenitas yang tinggi dan menyulitkan perbandingan langsung antarhasil (Nyadanu et al., 2022). Beberapa kajian juga mulai menekankan pentingnya analisis subkelompok berdasarkan status sosial ekonomi, kondisi kesehatan ibu, wilayah tempat tinggal, dan kelompok

minoritas, sementara penilaian kualitas bukti serta risiko bias belum diterapkan secara seragam (Michel et al., 2024). Dengan demikian, karakteristik umum literatur memperlihatkan dominasi pendekatan epidemiologis kuantitatif, fokus kuat pada polusi udara dan luaran perinatal, serta kebutuhan akan standarisasi pengukuran paparan, definisi luaran, dan metode penilaian kepastian bukti.

Sintesis Temuan

No.	Studi/sintesis (tahun)	Paparan dan periode	Luaran kesehatan	Hasil utama	Keterbatasan atau catatan
1	Uwak et al.	PM _{2.5} selama seluruh kehamilan	Berat lahir	Setiap kenaikan 10 µg/m ³ PM _{2.5} berkaitan dengan penurunan berat lahir sebesar 27,55 g.	Heterogenitas sangat tinggi ($I^2 = 94\%$) dan kepastian bukti dinilai rendah (Uwak et al., 2021).
2	Uwak et al.	PM _{2.5} pada trimester kedua	Berat lahir	Kenaikan 10 µg/m ³ PM _{2.5} berkaitan dengan penurunan berat lahir sebesar 5,69 g.	Heterogenitas berada pada tingkat sedang ($I^2 = 68\%$) (Uwak et al., 2021).
3	Uwak et al.	PM _{2.5} pada trimester ketiga	Berat lahir	Kenaikan 10 µg/m ³ PM _{2.5} berkaitan dengan penurunan berat lahir sebesar 10,67 g.	Heterogenitas tinggi ($I^2 = 84\%$) menunjukkan variasi antarkajian yang substansial (Uwak et al., 2021).
4	Uwak et al.	PM ₁₀ pada trimester ketiga	Berat lahir	Kenaikan 10 µg/m ³ PM ₁₀ berkaitan dengan penurunan berat lahir sebesar 6,57 g.	Heterogenitas minimal ($I^2 = 0\%$) dan kepastian bukti dinilai sedang (Uwak et al., 2021).
5	Uwak et al.	PM ₁₀ selama seluruh kehamilan	Berat lahir	Kenaikan 10 µg/m ³ PM ₁₀ berkaitan dengan penurunan berat lahir sebesar 8,65 g.	Heterogenitas tinggi ($I^2 = 84\%$) (Uwak et al., 2021).
6	Zhang dan Zhu, sebagaimana disintesis Nyadanu et al.	PM _{2.5} selama seluruh kehamilan	Small-for-gestational-age	Kenaikan 10 µg/m ³ PM _{2.5} berkaitan dengan peningkatan peluang SGA sebesar 15% (OR 1,15; 95% CI 1,10–1,20).	Estimasi berasal dari enam studi primer dengan heterogenitas rendah pada analisis tersebut (Nyadanu et al., 2022).
7	Zhang dan Zhu, sebagaimana disintesis Nyadanu et al.	PM _{2.5} pada trimester pertama	Small-for-gestational-age	Kenaikan 10 µg/m ³ PM _{2.5} berkaitan dengan peningkatan peluang SGA sebesar 7% (OR 1,07; 95% CI 1,05–1,10).	Analisis mencakup enam studi dan menunjukkan heterogenitas rendah (Nyadanu et al., 2022).
8	Zhang dan Zhu, sebagaimana disintesis Nyadanu et al.	PM _{2.5} pada trimester kedua	Small-for-gestational-age	Kenaikan 10 µg/m ³ PM _{2.5} berkaitan dengan peningkatan peluang SGA sebesar 6% (OR 1,06; 95% CI 1,02–1,10).	Heterogenitas lebih tinggi dibandingkan trimester pertama ($I^2 = 58\%$) (Nyadanu et al., 2022).

No.	Studi/sintesis (tahun)	Paparan dan periode	Luaran kesehatan	Hasil utama	Keterbatasan atau catatan
9	Zhang dan Zhu, sebagaimana disintesis Nyadanu et al.	PM _{2.5} pada trimester ketiga	Small-for-gestational-age	Kenaikan 10 µg/m ³ PM _{2.5} berkaitan dengan peningkatan peluang SGA sebesar 6% (OR 1,06; 95% CI 1,04–1,08).	Heterogenitas relatif rendah ($I^2 = 13\%$), tetapi jumlah studi tetap terbatas (Nyadanu et al., 2022).
10	Liu et al.	PM _{2.5} selama seluruh kehamilan	Term low birth weight	Kenaikan satu rentang interkuartil PM _{2.5} berkaitan dengan peningkatan peluang berat lahir rendah pada bayi cukup bulan sebesar 2% (OR 1,02; 95% CI 1,01–1,03).	Sintesis mencakup 61 studi dan 34.506.975 kelahiran tunggal, tetapi variasi wilayah dan metode pengukuran paparan tetap besar (Liu et al., 2023).
11	Liu et al.	PM ₁₀ selama seluruh kehamilan	Term low birth weight	Kenaikan satu rentang interkuartil PM ₁₀ berkaitan dengan peningkatan peluang berat lahir rendah pada bayi cukup bulan sebesar 3% (OR 1,03; 95% CI 1,01–1,05).	Sebagian besar studi memiliki risiko bias rendah, tetapi asosiasi tetap bergantung pada penyesuaian kovariat (Liu et al., 2023).
12	Liu et al.	PM ₁₀ pada trimester kedua	Term low birth weight	Efek paling kuat untuk PM ₁₀ tampak pada trimester kedua (OR 1,03; 95% CI 1,01–1,06).	Tidak ditemukan hubungan bermakna yang konsisten untuk PM _{2.5} pada setiap trimester (Liu et al., 2023).
13	Nyadanu et al.	PM _{2.5} selama seluruh kehamilan	Berat lahir	Sintesis umbrella review menunjukkan hubungan negatif yang relatif konsisten antara PM _{2.5} dan berat lahir.	Arah asosiasi konsisten, tetapi presisi dan heterogenitas antar-meta-analisis masih beragam (Nyadanu et al., 2022).
14	Nyadanu et al.	PM ₁₀ selama seluruh kehamilan	Berat lahir	PM ₁₀ juga menunjukkan pola hubungan terbalik dengan berat lahir.	Kekuatan bukti lebih dipengaruhi oleh perbedaan definisi paparan dan luaran antarstudi (Nyadanu et al., 2022).
15	Nyadanu et al.	PM _{2.5} selama kehamilan	Kelahiran prematur	Hubungan dengan kelahiran prematur cenderung positif, tetapi konsistensinya lebih rendah dibandingkan hubungan dengan berat lahir.	Bukti dipengaruhi heterogenitas tinggi, ketidakpresisian, dan variasi periode paparan (Nyadanu et al., 2021).

No.	Studi/sintesis (tahun)	Paparan dan periode	Luaran kesehatan	Hasil utama	Keterbatasan atau catatan
16	Nyadanu et al.	NO ₂ selama kehamilan	Kelahiran prematur	Paparan NO ₂ menunjukkan kemungkinan peningkatan risiko kelahiran prematur, tetapi arah dan besaran asosiasi belum sepenuhnya konsisten.	Kepastian bukti untuk paparan trimester dan seluruh kehamilan masih berada pada tingkat sedang atau terbatas (Nyadanu et al., 2021).
17	Nyadanu et al.	CO selama seluruh kehamilan	Berat lahir rendah	Hubungan antara paparan CO dan berat lahir rendah dilaporkan konsisten positif.	Bukti dikategorikan kuat dalam sintesis arah asosiasi, meskipun tetap didasarkan pada penelitian observasional (Nyadanu et al., 2021).
18	Nyadanu et al.	SO ₂ selama seluruh kehamilan	Berat lahir rendah	Paparan SO ₂ berkaitan secara positif dengan berat lahir rendah.	Kesimpulan kausal tetap dibatasi oleh heterogenitas dan tidak tersedianya bukti eksperimental (Nyadanu et al., 2021).
19	Bekkar et al.	PM _{2.5} atau ozon selama kehamilan	Kelahiran prematur	Sebanyak 19 dari 24 studi di Amerika Serikat menemukan hubungan bermakna antara PM _{2.5} atau ozon dan peningkatan risiko kelahiran prematur.	Perbandingan risiko dibatasi oleh perbedaan desain, pengukuran paparan, demografi, dan musim (Bekkar et al., 2020).
20	Bekkar et al.	PM _{2.5} atau ozon selama kehamilan	Berat lahir rendah	Sebanyak 25 dari 29 studi melaporkan hubungan bermakna antara paparan PM _{2.5} atau ozon dan berat lahir rendah.	Kelompok dengan asma dan kelompok minoritas, terutama ibu berkulit hitam, tampak memiliki risiko lebih tinggi (Bekkar et al., 2020).
21	Bekkar et al.	Polusi udara dan panas	Kelahiran mati	Tinjauan di Amerika Serikat menemukan bahwa paparan lingkungan terkait perubahan iklim berhubungan dengan luaran kehamilan yang merugikan, termasuk lahir mati.	Bukti antarwilayah tidak sepenuhnya seragam dan dipengaruhi perbedaan karakteristik populasi serta musim (Bekkar et al., 2020).
22	Ghosh et al.	PM _{2.5} ambien dan rumah tangga	Berat lahir dan usia gestasi	PM _{2.5} ambien maupun rumah tangga berkaitan dengan penurunan berat lahir dan usia gestasi.	Dampak tersebut berpotensi berkontribusi terhadap kematian neonatal dan bayi, terutama di negara berpendapatan rendah

No.	Studi/sintesis (tahun)	Paparan dan periode	Luaran kesehatan	Hasil utama	Keterbatasan atau catatan
					dan menengah (Ghosh et al., 2021).
23	Nyadanu et al.	PM _{2.5} dan PM ₁₀ selama seluruh kehamilan	Berat lahir	Umbrella review menunjukkan asosiasi positif yang konsisten antara paparan partikulat dan penurunan berat lahir di berbagai wilayah geografis.	Estimasi efek, presisi, dan tingkat heterogenitas berbeda antarwilayah dan sumber data (Nyadanu et al., 2022).
24	Wesley et al.	Polutan udara, bahan kimia, pengganggu endokrin, dan panas ekstrem	Luaran kehamilan	Tinjauan terbaru mengaitkan PM _{2.5} , NO ₂ , ozon, bahan kimia, pengganggu endokrin, dan panas ekstrem dengan kelahiran prematur, berat lahir rendah, pembatasan pertumbuhan janin, atau kehilangan kehamilan.	Tinjauan menekankan perlunya penelitian longitudinal yang menilai paparan kumulatif dan interaksi antarpaparan (Wesley et al., 2024).

Semua hasil tersebut memperlihatkan bahwa hubungan paling konsisten terdapat pada paparan PM_{2.5} dan PM₁₀ terhadap penurunan berat lahir, berat lahir rendah, serta SGA, sedangkan hubungan dengan kelahiran prematur dan lahir mati cenderung lebih bervariasi. Pola tersebut menunjukkan bahwa waktu paparan, jenis polutan, karakteristik sosial-demografis, kondisi kesehatan ibu, serta metode estimasi paparan berperan dalam membentuk perbedaan hasil antarpemeriksaan. Sintesis terhadap 36 tinjauan sistematis yang mencakup 295 studi primer juga menunjukkan bahwa heterogenitas, ketidakpresisian, dan keterbatasan penilaian kausal masih menjadi persoalan utama dalam interpretasi bukti (Nyadanu et al., 2021, 2022).

PEMBAHASAN

Temuan yang teridentifikasi secara luas ini mengonfirmasi hipotesis bahwa polusi udara merupakan determinan lingkungan yang signifikan terhadap luaran reproduksi, dengan mekanisme yang kemungkinan besar melibatkan respons inflamasi sistemik dan stres oksidatif pada ibu hamil. Namun, konfirmasi tersebut perlu dipahami secara hati-hati karena sebagian besar bukti yang tersedia berasal dari penelitian observasional, sehingga hubungan yang ditemukan belum sepenuhnya dapat ditafsirkan sebagai kausal. Umbrella review terhadap 36 tinjauan sistematis dan 295 studi primer menunjukkan bahwa arah asosiasi relatif konsisten untuk penurunan berat lahir, tetapi tingkat kepastian bukti tetap dipengaruhi oleh heterogenitas, ketidakpresisian, dan variasi kualitas metodologis (Nyadanu et al., 2021, 2022).

Dalam kerangka teori *developmental origins of health and disease*, masa kehamilan merupakan periode sensitif ketika gangguan lingkungan dapat memengaruhi pertumbuhan dan pematangan organ janin. Paparan polutan selama periode tersebut tidak hanya berpotensi mengurangi berat lahir, tetapi juga dapat mengubah lintasan perkembangan janin melalui gangguan fungsi plasenta, aliran darah uteroplasenta, dan transfer oksigen serta nutrisi. Dengan demikian, berat lahir rendah dan SGA dapat dipahami sebagai indikator awal dari gangguan pertumbuhan intrauterin, meskipun keduanya tidak selalu sepenuhnya merepresentasikan pembatasan pertumbuhan janin yang sebenarnya.

Stres oksidatif dan inflamasi menyediakan penjelasan biologis yang koheren bagi hubungan antara paparan partikulat dan luaran kelahiran. Paparan PM_{2.5} selama kehamilan dilaporkan dapat meningkatkan respons proinflamasi sistemik dan inflamasi plasenta, sedangkan kerusakan oksidatif dapat memengaruhi jaringan intrauterin serta fungsi mitokondria (Johnson et al., 2021). Proses tersebut berpotensi mengganggu diferensiasi trofoblas, angiogenesis, dan kemampuan plasenta dalam mempertahankan pertukaran zat antara ibu dan janin.

Plasenta juga dapat diposisikan sebagai jaringan target utama yang menghubungkan paparan maternal dengan perubahan pertumbuhan janin. Kajian mekanistik menunjukkan bahwa polusi udara dapat memengaruhi plasenta melalui stres oksidatif dan nitrosatif, inflamasi, gangguan endokrin, perubahan epigenetik, serta disregulasi vaskular pada unit maternal–janin (Fussell et al., 2023). Mekanisme yang berlapis ini membantu menjelaskan mengapa besaran asosiasi berbeda menurut jenis polutan, komposisi campuran, tingkat paparan, dan tahap perkembangan plasenta.

Hasil kajian menunjukkan bahwa hubungan paling konsisten ditemukan pada berat lahir, khususnya setelah paparan PM_{2.5} dan PM₁₀ selama seluruh kehamilan. Temuan Liu et al. memperlihatkan bahwa peningkatan satu rentang interkuartil paparan selama kehamilan berkaitan dengan peningkatan peluang berat lahir rendah pada bayi cukup bulan, dengan efek PM₁₀ yang lebih kuat pada trimester kedua (Liu et al., 2023). Pola ini memperkuat dugaan bahwa paparan partikulat dapat memengaruhi pertumbuhan janin secara kumulatif, sementara periode tertentu mungkin merepresentasikan jendela kerentanan biologis yang lebih spesifik.

Sebaliknya, hubungan antara polusi udara dan kelahiran prematur tampak lebih tidak seragam. Umbrella review menunjukkan bahwa asosiasi PM_{2.5} dan NO₂ dengan kelahiran prematur cenderung positif, tetapi konsistensi dan kepastian buktinya lebih rendah dibandingkan hubungan antara partikulat dan penurunan berat lahir (Nyadanu et al., 2021). Perbedaan tersebut dapat terjadi karena kelahiran prematur merupakan luaran multifaktorial yang juga dipengaruhi infeksi, hipertensi kehamilan, status gizi, stres psikososial, riwayat obstetri, serta akses terhadap pelayanan antenatal.

Variasi hasil antarpelitian juga menunjukkan pentingnya mempertimbangkan waktu paparan secara lebih presisi. Pembagian paparan berdasarkan trimester memang berguna untuk mengidentifikasi periode sensitif, tetapi pendekatan tersebut dapat menyederhanakan perubahan paparan harian atau mingguan dan mengabaikan efek kumulatif antarfase kehamilan. Penelitian mendatang perlu menggunakan model *distributed lag* atau pendekatan longitudinal dengan resolusi temporal lebih tinggi agar hubungan antara paparan dan perubahan pertumbuhan janin dapat dipetakan secara lebih akurat.

Selain waktu paparan, karakteristik sosial-demografis berpotensi memodifikasi dampak polusi udara. Tinjauan di Amerika Serikat menemukan risiko yang lebih tinggi pada ibu dengan asma dan kelompok minoritas, terutama ibu berkulit hitam, meskipun perbandingan antarstudi dibatasi oleh perbedaan desain, pengukuran paparan, demografi, dan musim (Bekkar et al., 2020). Temuan tersebut mengindikasikan bahwa polusi udara tidak bekerja dalam ruang sosial yang netral, melainkan berinteraksi dengan kondisi perumahan, status sosial ekonomi, paparan pekerjaan, stres kronis, kualitas gizi, dan akses terhadap layanan kesehatan.

Dari perspektif epidemiologi lingkungan, faktor sosial-demografis tidak semestinya hanya diperlakukan sebagai kovariat pengganggu. Status sosial ekonomi, misalnya, dapat memengaruhi lokasi tempat tinggal, kedekatan dengan sumber emisi, kemampuan mengurangi paparan, serta kerentanan biologis terhadap stres oksidatif dan inflamasi. Karena itu, penelitian perlu membedakan antara faktor perancu, mediator, dan pemodifikasi efek agar interpretasi hubungan polusi udara dan luaran reproduksi tidak berhenti pada estimasi asosiasi rata-rata yang dapat menyamarkan kelompok paling rentan.

Kajian ini juga memperlihatkan bahwa kualitas kesimpulan sangat bergantung pada cara paparan dan luaran didefinisikan. Penggunaan alamat tempat tinggal sebagai proksi paparan dapat menimbulkan salah klasifikasi karena tidak memperhitungkan mobilitas ibu, paparan di tempat kerja, ventilasi rumah, maupun kontribusi polusi udara dalam ruang. Di sisi lain, penggunaan berat lahir rendah atau SGA sebagai pengganti pembatasan pertumbuhan janin dapat menghasilkan kesalahan klasifikasi karena tidak seluruh bayi dengan berat lahir rendah mengalami gangguan pertumbuhan patologis (Nobles et al., 2018).

Kesenjangan metodologis tersebut menjadi penting ketika hasil penelitian digunakan untuk menyusun rekomendasi kebijakan. Bukti yang ada cukup kuat untuk mendukung prinsip kehati-hatian dan pengurangan paparan, tetapi belum selalu cukup rinci untuk menentukan ambang risiko, periode intervensi paling efektif, atau kontribusi relatif setiap polutan dalam campuran lingkungan. Oleh sebab itu, interpretasi kebijakan sebaiknya tidak hanya berfokus pada perubahan perilaku individu, tetapi juga mencakup pengendalian sumber emisi, peningkatan kualitas udara permukiman, perlindungan pekerja hamil, dan penguatan sistem pemantauan lingkungan.

Kontribusi utama kajian ini adalah memperjelas bahwa hubungan polusi udara dan luaran reproduksi bersifat multidimensional, melibatkan interaksi antara karakteristik polutan, waktu paparan, mekanisme plasenta, kondisi maternal, serta konteks sosial. Sintesis sebelumnya telah menunjukkan adanya pola negatif yang relatif konsisten antara partikulat dan berat lahir, tetapi kajian ini menegaskan bahwa konsistensi arah asosiasi tidak selalu identik dengan kepastian kausal yang tinggi (Nyadanu et al., 2022). Dengan demikian, pengembangan bidang kajian perlu menggabungkan epidemiologi, toksikologi, ilmu plasenta, analisis spasial, dan ilmu sosial agar perbedaan hasil antarpencapaian dapat dijelaskan secara lebih komprehensif.

Arah penelitian selanjutnya sebaiknya mencakup pengukuran paparan personal dan spasial beresolusi tinggi, analisis campuran multipolutan, pemodelan interaksi antara polusi udara dan panas ekstrem, serta pemeriksaan biomarker inflamasi, stres oksidatif, dan fungsi plasenta. Penelitian juga perlu memperluas luaran dari berat lahir dan kelahiran prematur menuju pertumbuhan janin serial, lahir mati, kehilangan kehamilan, serta dampak perkembangan anak dalam jangka panjang. Pendekatan tersebut akan membantu menguji jalur biologis yang diusulkan sekaligus menentukan apakah kelompok sosial tertentu mengalami kerentanan yang lebih besar.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Penelitian ini menegaskan bahwa paparan polusi udara, terutama partikulat, berkaitan dengan gangguan pertumbuhan janin dan luaran kelahiran yang merugikan melalui jalur inflamasi, stres oksidatif, gangguan vaskularisasi plasenta, serta perubahan fungsi plasenta (Fussell et al., 2023).
2. Meskipun arah asosiasi antara polusi udara dan penurunan berat lahir atau pertumbuhan janin cenderung negatif, tingkat konsistensi dan kepastian kausalnya masih dipengaruhi oleh perbedaan periode paparan, metode pengukuran, definisi luaran, serta karakteristik populasi (Nyadanu et al., 2022). Kajian ini berkontribusi dengan menunjukkan bahwa interpretasi hubungan tersebut perlu mempertimbangkan interaksi antara faktor biologis, sosial-demografis, dan lingkungan, bukan hanya besaran efek rata-rata pada tingkat populasi.

Saran

Penelitian berikutnya perlu menggunakan kohort prospektif dengan pemantauan paparan personal dan spasial beresolusi tinggi, analisis multipolutan, pengukuran pertumbuhan janin secara serial, serta

pemeriksaan biomarker inflamasi dan stres oksidatif untuk memperjelas periode sensitif dan jalur biologis yang berperan (Nyadanu et al., 2022). Selain itu, analisis perlu menguji pemodifikasi efek seperti asma, status sosial ekonomi, ras atau etnis, dan kondisi perumahan agar kelompok yang paling rentan dapat diidentifikasi secara lebih tepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Bekkar, B., Pacheco, S. E., Basu, R., & DeNicola, N. G. (2020). Association of Air Pollution and Heat Exposure With Preterm Birth, Low Birth Weight, and Stillbirth in the US. *JAMA Network Open*, 3(6). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2020.8243>
- Fuller, R., Landrigan, P. J., Balakrishnan, K., Bathan, G., Böse-O'Reilly, S., Bräuer, M., Caravanos, J., Chiles, T., Cohen, A., Corra, L., Cropper, M., Ferraro, G. L., Hanna, J. L., Hanrahan, D., Hu, H., Hunter, D., Janata, G., Kupka, R., Lanphear, B. P., ... Yan, C. (2022). Pollution and health: a progress update. *The Lancet Planetary Health*, 6(6). [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(22)00090-0)
- Fussell, J. C., Jauniaux, E., Smith, R. B., & Burton, G. J. (2023). Ambient air pollution and adverse birth outcomes: A review of underlying mechanisms. *BJOG An International Journal of Obstetrics & Gynaecology*, 131(5), 538–550. <https://doi.org/10.1111/1471-0528.17727>
- Ghosh, R., Causey, K., Burkart, K., Wozniak, S., Cohen, A., & Bräuer, M. (2021). Ambient and household PM_{2.5} pollution and adverse perinatal outcomes: A meta-regression and analysis of attributable global burden for 204 countries and territories. *PLoS Medicine*, 18(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003718>
- Johnson, N. M., Hoffmann, A. R., Behlen, J., Lau, C., Pendleton, D., Harvey, N., Shore, R. A., Li, Y., Chen, J., Tian, Y., & Zhang, R. (2021). Air pollution and children's health—a review of adverse effects associated with prenatal exposure from fine to ultrafine particulate matter. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 26(1), 72. <https://doi.org/10.1186/s12199-021-00995-5>
- Liu, J., Chen, Y., Liu, D., Ye, F., Sun, Q., Huang, Q., Dong, J., Pei, T., He, Y., & Zhang, Q. (2023). Prenatal exposure to particulate matter and term low birth weight: systematic review and meta-analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(23), 63335–63346. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26831-7>
- Menon, J. M. L., Struijs, F., & Whaley, P. (2022). The methodological rigour of systematic reviews in environmental health. *Critical Reviews in Toxicology*, 52(3), 167–187. <https://doi.org/10.1080/10408444.2022.2082917>
- Michel, S., Atmakuri, A., & Ehrenstein, O. S. von. (2024). Systems for rating bodies of evidence used in systematic reviews of air pollution exposure and reproductive and children's health: a methodological survey. *Environmental Health*, 23(1), 32. <https://doi.org/10.1186/s12940-024-01069-z>
- Nobles, C. J., Grantz, K. L., Liu, D., Williams, A., Ouidir, M., Seeni, I., Sherman, S., & Mendola, P. (2018). Ambient air pollution and fetal growth restriction: Physician diagnosis of fetal growth restriction versus population-based small-for-gestational age. *The Science of The Total Environment*, 650, 2641–2647. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.362>
- Nyadanu, S. D., Dunne, J., Tessema, G. A., Mullins, B. J., Duko, B., & Pereira, G. (2021). 1371 Ambient air pollution and adverse birth outcomes: a systematic synthesis of meta-analyses

of epidemiological studies. *International Journal of Epidemiology*, 50. <https://doi.org/10.1093/ije/dyab168.496>

- Nyadanu, S. D., Dunne, J., Tessema, G. A., Mullins, B. J., Kumi-Boateng, B., Bell, M. L., Duko, B., & Pereira, G. (2022). Prenatal exposure to ambient air pollution and adverse birth outcomes: An umbrella review of 36 systematic reviews and meta-analyses. *Environmental Pollution*, 306, 119465. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119465>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J., Akl, E. A., Brennan, S., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Rojas-Rueda, D., Morales-Zamora, E., Alsufyani, W. A., Herbst, C. H., Albalawi, S., Alsukait, R. F., & Alomran, M. (2021). Environmental Risk Factors and Health: An Umbrella Review of Meta-Analyses. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(2), 704. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020704>
- Shetty, S. S., Deepthi, D., Harshitha, S., Sonkusare, S., Naik, P. B., Kumari, S., & Madhyastha, H. (2023). Environmental pollutants and their effects on human health. *Heliyon*, 9(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19496>
- Uwak, I., Olson, N., Fuentes, A. M., Moriarty, M., Pulczynski, J. C., Lam, J., Xu, X., Taylor, B. D., Taiwo, S., Koehler, K., Foster, M., Chiu, W. A., & Johnson, N. M. (2021). Application of the navigation guide systematic review methodology to evaluate prenatal exposure to particulate matter air pollution and infant birth weight. *Environment International*, 148, 106378. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106378>
- Wesley, S. R., Gallo, M., Apata, T., Dis, J. van, & Hollenbach, S. J. (2024). Impact of Endocrine-Disrupting Chemicals, Climate, and Air Pollution on Pregnancy Outcomes: A Scoping Review. *Seminars in Reproductive Medicine*, 42(4), 312–329. <https://doi.org/10.1055/s-0044-1800961>