

Blood Lead Levels and Their Association with Growth and Development in Children Living Near Small-Scale Metal Smelting Industries in Tegal, Indonesia

Siswati Siswati^{1,2*}, Budiyo Budiyo¹, Mursid Mursid¹, Siti Fatimah¹

¹Faculty of Public Health, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

²Faculty of Health Sciences, Universitas Bhamada Slawi, Indonesia

*Corresponding Author ; jinanalmira@gmail.com



©2026. This open-access article is distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

Info Artikel: Diterima 2 Juni 2026 ; Direvisi 13 Oktober 2026 ; Disetujui 15 Oktober 2026
Tersedia online : 26 Oktober 2026 ; Diterbitkan secara teratur : Oktober 2026



Cara sitasi: Siswati, Budiyo, Mursid, Fatimah S. Blood Lead Levels and Their Association with Growth and Development in Children Living Near Small-Scale Metal Smelting Industries in Tegal, Indonesia. Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia [Online]. 2026 Okt;25(3):334-344. <https://doi.org/10.14710/jkli.85112>.

ABSTRAK

Latar belakang: Paparan timbal (Pb) masih menjadi masalah kesehatan lingkungan yang berdampak serius terhadap pertumbuhan dan perkembangan anak, terutama pada wilayah dengan aktivitas industri informal. Anak yang terpapar timbal berisiko mengalami gangguan pertumbuhan linear, keterlambatan perkembangan, dan gangguan neurologis. Kabupaten Tegal merupakan salah satu wilayah dengan aktivitas peleburan logam rumah tangga yang berpotensi meningkatkan pencemaran timbal di lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis hubungan kadar timbal darah dengan pertumbuhan dan perkembangan anak usia balita di Desa Pesarean, Kabupaten Tegal.

Metode: Penelitian ini merupakan penelitian observasional analitik dengan pendekatan cross-sectional yang dilakukan pada April–Juni 2025. Sampel penelitian sebanyak 110 anak usia 24–60 bulan yang dipilih menggunakan teknik purposive sampling. Pemeriksaan kadar timbal darah dilakukan menggunakan metode Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). Pertumbuhan anak dinilai menggunakan indikator antropometri WHO, sedangkan perkembangan anak diukur menggunakan Kuesioner Pra Skrining Perkembangan (KPSP). Analisis data dilakukan secara univariat, bivariat menggunakan uji korelasi Pearson, dan multivariat menggunakan regresi linier berganda.

Hasil: Rerata kadar Pb darah anak sebesar $22,64 \pm 12,34$ $\mu\text{g/dL}$ dan seluruh subjek memiliki kadar Pb darah di atas ambang batas aman WHO (<5 $\mu\text{g/dL}$). Sebagian besar anak memiliki kadar Pb darah kategori menengah hingga tinggi. Terdapat hubungan negatif signifikan antara kadar Pb darah dengan pertumbuhan anak ($r = -0,312$; $p = 0,015$) serta perkembangan anak ($r = -0,298$; $p = 0,021$). Analisis regresi linier berganda menunjukkan bahwa kadar Pb darah merupakan prediktor independen terhadap gangguan pertumbuhan dan perkembangan anak setelah dikontrol oleh variabel confounding.

Simpulan: Kadar timbal darah yang tinggi berhubungan signifikan dengan gangguan pertumbuhan dan perkembangan anak usia balita di kawasan industri peleburan logam informal Kabupaten Tegal. Penguatan program kesehatan lingkungan, pemantauan kadar Pb darah, serta pengendalian pencemaran industri diperlukan untuk mencegah dampak jangka panjang pada anak.

Kata kunci: Timbal; Pertumbuhan anak; Perkembangan anak; Stunting; Kesehatan lingkungan

ABSTRACT

Background: Lead (Pb) exposure remains a major environmental health problem that seriously affects children's growth and development, particularly in areas with informal industrial activities. Children exposed to lead are at risk of impaired linear growth, developmental delay, and neurological disorders. Tegal Regency is one of the areas with household-scale metal smelting activities that potentially increase environmental lead contamination. This study aimed to analyze the association between blood lead levels and the growth and developmental status of children under five years old in Pesarean Village, Tegal Regency.

Methods: This study was an analytical observational study with a cross-sectional design conducted from April to June 2025. A total of 110 children aged 24–60 months were selected using purposive sampling. Blood lead levels were measured using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). Child growth was assessed using WHO anthropometric indicators, while child development was evaluated using the Pre-Screening Developmental Questionnaire (KPSP). Data were analyzed using univariate analysis, Pearson correlation test, and multiple linear regression.

Results: The mean blood lead level among children was $22.64 \pm 12.34 \mu\text{g/dL}$, and all subjects had blood lead levels above the WHO safety threshold ($<5 \mu\text{g/dL}$). Most children had moderate to high blood lead levels. Significant negative correlations were found between blood lead levels and child growth ($r = -0.312$; $p = 0.015$) as well as child development ($r = -0.298$; $p = 0.021$). Multiple linear regression analysis showed that blood lead level was an independent predictor of impaired growth and developmental outcomes after controlling for confounding variables.

Conclusion: Elevated blood lead levels were significantly associated with impaired growth and developmental outcomes among children living near informal metal smelting industries in Tegal Regency. Strengthening environmental health programs, monitoring blood lead levels, and controlling industrial pollution are necessary to prevent long-term adverse effects on children.

Keywords: Lead; Child growth; Child development; Stunting; Environmental health

PENDAHULUAN

Paparan timbal (Pb) masih menjadi salah satu masalah kesehatan lingkungan global yang berdampak serius terhadap kesehatan anak, terutama di negara berkembang dengan aktivitas industri informal yang tinggi. Timbal merupakan logam berat toksik yang bersifat neurotoksik dan tidak memiliki fungsi fisiologis dalam tubuh manusia. Anak-anak merupakan kelompok yang paling rentan terhadap paparan timbal karena sistem saraf pusat, sistem imun, dan organ metabolisme masih berada dalam tahap perkembangan aktif. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) menyatakan bahwa tidak terdapat ambang batas aman paparan timbal pada anak karena bahkan kadar yang rendah sekalipun dapat menyebabkan gangguan neurologis, gangguan perilaku, penurunan kemampuan kognitif, anemia, dan gangguan pertumbuhan linear.^{1,2}

Paparan timbal pada anak dapat terjadi melalui inhalasi debu, konsumsi makanan atau air yang terkontaminasi, serta kontak langsung dengan tanah yang tercemar limbah industri. Aktivitas peleburan logam, daur ulang aki bekas, pembakaran limbah elektronik, dan penggunaan bahan berbasis timbal menjadi sumber utama pencemaran lingkungan di berbagai negara berkembang. Timbal yang masuk ke dalam tubuh dapat terakumulasi pada darah, tulang, hati, dan jaringan saraf sehingga menyebabkan efek toksik kronis jangka panjang. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa anak yang tinggal di sekitar kawasan industri memiliki risiko lebih tinggi mengalami gangguan perkembangan neurobehavioral dibandingkan anak yang tinggal di wilayah non-industri.^{3,4}

Secara biologis, timbal dapat mengganggu berbagai proses metabolisme penting dalam tubuh. Timbal diketahui menghambat aktivitas enzim delta-aminolevulinic acid dehydratase (ALAD) dan ferrochelataze yang berperan dalam sintesis hemoglobin sehingga meningkatkan risiko anemia pada anak. Selain itu, timbal juga mengganggu metabolisme kalsium, seng, dan zat besi yang berperan penting dalam pertumbuhan tulang dan perkembangan otak. Gangguan metabolisme tersebut dapat menyebabkan hambatan pertumbuhan linear, penurunan fungsi kognitif, keterlambatan perkembangan motorik, serta gangguan perilaku pada anak usia dini.^{5,6}

Masalah paparan timbal (Pb) menjadi semakin penting di Indonesia karena masih ditemukan aktivitas industri informal yang berpotensi menghasilkan pencemaran lingkungan akibat pengelolaan limbah yang belum memadai. Kabupaten Tegal, khususnya Desa Pesarean, Kecamatan Adiwerna, merupakan salah satu wilayah yang memiliki riwayat aktivitas peleburan logam dan daur ulang aki bekas. Penelitian Lestari et al. (2018) di Desa Pesarean, berdasarkan data pemeriksaan darah tahun 2015, melaporkan bahwa sebagian besar dari 51 responden memiliki kadar Pb darah di atas $20 \mu\text{g/dL}$, bahkan 69% responden memiliki kadar Pb darah lebih dari $40 \mu\text{g/dL}$. Temuan tersebut menunjukkan tingginya paparan timbal pada masyarakat yang tinggal di sekitar kawasan peleburan logam. Selain itu, penelitian Zarmawi dan Haryanto (2023) terhadap 193 anak usia 2–9 tahun di kawasan pertambangan timah Pulau Bangka melaporkan rerata geometrik kadar Pb darah sebesar $5,5 \mu\text{g/dL}$ dan menemukan adanya hubungan antara kadar Pb darah dengan kejadian stunting setelah mempertimbangkan sejumlah faktor perancu. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa paparan timbal di kawasan industri dan pertambangan

merupakan masalah kesehatan lingkungan yang perlu mendapat perhatian, khususnya pada kelompok anak yang rentan terhadap gangguan pertumbuhan dan perkembangan. Oleh karena itu, penelitian mengenai kadar Pb darah pada anak usia balita yang tinggal di sekitar kawasan peleburan logam informal di Desa Pesarean penting dilakukan untuk memberikan bukti empiris mengenai hubungan paparan timbal dengan pertumbuhan dan perkembangan anak.^{7,8,9}

Di sisi lain, masalah stunting dan keterlambatan perkembangan anak masih menjadi tantangan kesehatan masyarakat di Indonesia. Data Dinas Kesehatan Kabupaten Tegal menunjukkan bahwa prevalensi stunting di Kabupaten Tegal masih berada pada kategori masalah kesehatan masyarakat meskipun mengalami penurunan dalam beberapa tahun terakhir. Selama ini, program percepatan penurunan stunting lebih banyak berfokus pada intervensi gizi dan sanitasi dasar, sedangkan faktor pencemaran lingkungan seperti paparan logam berat masih belum banyak mendapat perhatian. Beberapa penelitian global menunjukkan bahwa paparan timbal berhubungan dengan peningkatan risiko stunting dan gangguan perkembangan anak melalui mekanisme stres oksidatif, gangguan metabolisme mineral, dan kerusakan sistem saraf pusat.^{10,11}

Penelitian mengenai hubungan kadar timbal darah dengan pertumbuhan dan perkembangan anak di kawasan industri informal Indonesia masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya dilakukan pada kawasan industri besar atau wilayah perkotaan, sedangkan penelitian pada kawasan peleburan logam rumah tangga masih jarang dilaporkan. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki nilai kebaruan (novelty) karena mengevaluasi hubungan kadar timbal darah dengan pertumbuhan dan perkembangan anak usia 24–60 bulan pada kawasan peleburan logam skala rumah tangga di Kabupaten Tegal. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan kebijakan kesehatan lingkungan, program pencegahan stunting berbasis risiko lingkungan, serta penguatan pengawasan industri informal di Indonesia.^{12,13}

Penelitian ini bertujuan menganalisis hubungan kadar timbal darah dengan pertumbuhan dan perkembangan anak usia 24–60 bulan di Desa Pesarean, Kabupaten Tegal.

MATERI DAN METODE

Desain, Lokasi, dan Waktu Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian observasional analitik dengan desain cross-sectional yang bertujuan menganalisis hubungan kadar timbal darah dengan pertumbuhan dan perkembangan anak usia 24–60 bulan. Penelitian dilaksanakan pada bulan April–Juni 2025 di Desa Pesarean, Kecamatan Adiwerna, Kabupaten Tegal, Jawa Tengah, Indonesia. Desa Pesarean dipilih sebagai lokasi penelitian karena merupakan wilayah dengan riwayat aktivitas peleburan logam dan daur ulang aki bekas yang berpotensi menyebabkan pencemaran timbal lingkungan.

Populasi dan Sampel

Populasi target penelitian adalah seluruh anak usia 24–60 bulan yang berdomisili di Desa Pesarean sebanyak 295 balita. Kerangka sampel disusun berdasarkan daftar balita yang terdaftar pada Posyandu dan Puskesmas wilayah Desa Pesarean tahun 2025. Sampel dipilih menggunakan teknik purposive sampling karena penelitian memerlukan subjek dengan karakteristik khusus, yaitu anak usia balita yang tinggal pada wilayah dengan potensi paparan timbal lingkungan dan bersedia menjalani pemeriksaan kadar timbal darah.

Kriteria inklusi penelitian meliputi: (1) anak berusia 24–60 bulan; (2) berdomisili di Desa Pesarean minimal selama 2 tahun terakhir; (3) terdaftar pada Posyandu atau Puskesmas setempat; (4) orang tua atau wali bersedia mengikuti penelitian dan menandatangani informed consent; serta (5) anak mengikuti seluruh prosedur penelitian.

Kriteria eksklusi meliputi: (1) anak dengan kelainan kongenital mayor yang dapat memengaruhi pertumbuhan dan perkembangan; (2) anak dengan riwayat gangguan neurologis berat yang telah didiagnosis sebelumnya; (3) anak yang sedang mengalami penyakit akut berat saat pengumpulan data; dan (4) anak yang tidak menyelesaikan seluruh tahapan pemeriksaan penelitian.

Untuk meminimalkan bias seleksi, rekrutmen dilakukan pada seluruh wilayah dusun di Desa Pesarean menggunakan daftar balita resmi dari Posyandu dan Puskesmas. Seluruh calon responden dinilai menggunakan kriteria inklusi dan eksklusi yang sama sebelum ditetapkan sebagai subjek penelitian. Jumlah sampel akhir yang dianalisis sebanyak 110 anak.

Pemeriksaan Kadar Timbal Darah

Kadar timbal darah (Blood Lead Level/BLL) diukur menggunakan sampel darah kapiler yang diperoleh melalui metode finger prick oleh tenaga kesehatan terlatih. Sebelum pengambilan sampel, area ujung jari dibersihkan menggunakan alkohol 70% dan dibiarkan mengering untuk meminimalkan risiko kontaminasi eksternal. Sampel darah kapiler sebanyak $\pm 0,5$ mL dikumpulkan ke dalam tabung mikro yang mengandung antikoagulan EDTA dan disimpan sesuai prosedur penyimpanan sampel biologis sebelum dikirim ke Laboratorium Kesehatan Daerah (LABKESDA) Kabupaten Tegal.

Analisis kadar timbal darah dilakukan menggunakan metode Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) sesuai standar operasional prosedur laboratorium. Sebelum analisis, sampel menjalani proses preparasi dan

destruksi sesuai protokol laboratorium untuk memastikan logam timbal dapat terukur secara optimal. Hasil pemeriksaan dilaporkan dalam satuan mikrogram per desiliter ($\mu\text{g/dL}$).

Untuk menjamin validitas hasil pemeriksaan, laboratorium menerapkan prosedur quality control internal yang meliputi kalibrasi instrumen secara berkala, penggunaan larutan standar, pemeriksaan blanko, dan verifikasi hasil pengukuran sesuai standar laboratorium kesehatan. Seluruh pemeriksaan dilakukan oleh analis laboratorium yang kompeten dan menggunakan prosedur yang seragam untuk seluruh sampel penelitian.

Pengukuran Pertumbuhan

Pertumbuhan anak dinilai berdasarkan indeks Tinggi Badan menurut Umur (TB/U) menggunakan standar pertumbuhan anak WHO 2024. Pengukuran tinggi badan dilakukan menggunakan microtoise dengan ketelitian 0,1 cm. Nilai z-score TB/U dihitung menggunakan perangkat lunak WHO Anthro. Anak dikategorikan stunting apabila memiliki nilai z-score TB/U < -2 SD, sedangkan anak dengan z-score ≥ -2 SD dikategorikan tidak stunting.

Penilaian Perkembangan Anak

Perkembangan anak dinilai menggunakan Kuesioner Pra Skrining Perkembangan (KPSP) yang direkomendasikan oleh Kementerian Kesehatan Republik Indonesia dalam program Stimulasi, Deteksi dan Intervensi Dini Tumbuh Kembang (SDIDTK). KPSP merupakan instrumen skrining perkembangan anak usia 0–72 bulan yang mencakup empat domain perkembangan, yaitu motorik kasar, motorik halus, bahasa, dan personal sosial.

Formulir KPSP disesuaikan dengan kelompok usia anak dan terdiri atas 10 item pertanyaan atau tugas perkembangan. Setiap jawaban “Ya” diberikan skor 1 dan jawaban “Tidak” diberikan skor 0, sehingga skor total berkisar antara 0–10.

Interpretasi hasil KPSP dilakukan sesuai pedoman Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, yaitu skor 9–10 dikategorikan sebagai perkembangan sesuai usia, skor 7–8 sebagai perkembangan meragukan, dan skor ≤ 6 sebagai kemungkinan penyimpangan perkembangan yang memerlukan evaluasi lebih lanjut. Untuk keperluan analisis statistik, hasil perkembangan selanjutnya dikategorikan menjadi perkembangan normal (skor 9–10) dan perkembangan tidak normal (skor ≤ 8).

KPSP telah digunakan secara luas pada pelayanan kesehatan primer di Indonesia dan direkomendasikan dalam program SDIDTK sebagai alat skrining perkembangan anak. Instrumen ini memiliki validitas isi yang telah dievaluasi oleh para ahli tumbuh kembang anak dan digunakan secara nasional dalam pemantauan perkembangan balita.

Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan perangkat lunak Statistical Package for Social Sciences (SPSS) versi 26. Analisis univariat digunakan untuk menggambarkan karakteristik responden. Hubungan antara kadar timbal darah dengan pertumbuhan dan perkembangan anak dianalisis menggunakan uji Chi-square dengan tingkat kemaknaan $p < 0,05$.

Pertimbangan Etik

Penelitian ini telah memperoleh persetujuan etik dari Komite Etik Penelitian Kesehatan Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Diponegoro dengan nomor surat keputusan No: 300/EA/KEPK-FKM/2025 sebelum pelaksanaan penelitian. Orang tua atau wali responden diberikan penjelasan mengenai tujuan dan prosedur penelitian serta menandatangani informed consent sebelum pengumpulan data dilakukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Tabel 1. Karakteristik Subjek Penelitian

Variabel	Kategori	n	%
Jenis Kelamin	Laki-laki	57	51,8
	Perempuan	53	48,2
Status Gizi	Stunting	40	36,4
	Normal	70	63,6
Perkembangan	Normal	65	59,1
	Keterlambatan	45	40,9

Berdasarkan Tabel 1, dari 110 anak yang menjadi subjek penelitian, sebagian besar berjenis kelamin laki-laki, yaitu 57 anak (51,8%), sedangkan perempuan sebanyak 53 anak (48,2%). Berdasarkan status gizi, sebanyak 40 anak (36,4%) mengalami stunting, sementara 70 anak (63,6%) memiliki status gizi normal. Ditinjau dari aspek perkembangan, sebanyak 65 anak (59,1%) menunjukkan perkembangan normal, sedangkan 45 anak (40,9%) mengalami keterlambatan perkembangan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa meskipun sebagian besar anak memiliki status pertumbuhan dan perkembangan normal, proporsi anak yang mengalami stunting dan keterlambatan perkembangan masih cukup besar. Kondisi ini menjadi dasar untuk menganalisis lebih lanjut hubungan kadar timbal (Pb) darah dengan pertumbuhan dan perkembangan anak di wilayah penelitian.

Tabel 2. Distribusi Kadar Timbal Darah

Kategori	Rentang ($\mu\text{g/dL}$)	N	%
Rendah	5–9	7	6,4
Menengah	10–19	55	50,0
Sedang	20–29	24	21,8
Tinggi	30–44	15	13,6
Sangat Tinggi	≥ 45	9	8,2

Centers for Disease Control and Prevention. *CDC Updates Blood Lead Reference Value*. Atlanta: CDC; 2024

Berdasarkan Tabel 2, distribusi kadar timbal (Pb) darah pada 110 anak menunjukkan bahwa sebagian besar anak berada pada kategori menengah, yaitu sebanyak 55 anak (50,0%) dengan kadar Pb darah 10–19 $\mu\text{g/dL}$. Sebanyak 24 anak (21,8%) memiliki kadar Pb darah 20–29 $\mu\text{g/dL}$ atau kategori sedang, sedangkan 15 anak (13,6%) berada pada kategori tinggi dengan kadar 30–44 $\mu\text{g/dL}$. Selanjutnya, sebanyak 9 anak (8,2%) memiliki kadar Pb darah sangat tinggi, yaitu ≥ 45 $\mu\text{g/dL}$, dan hanya 7 anak (6,4%) yang berada pada kategori rendah dengan kadar 5–9 $\mu\text{g/dL}$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa seluruh subjek penelitian memiliki kadar Pb darah minimal 5 $\mu\text{g/dL}$, dengan 43,6% anak memiliki kadar Pb darah ≥ 20 $\mu\text{g/dL}$. Temuan ini menggambarkan tingginya beban paparan timbal pada anak-anak di wilayah penelitian dan memperkuat pentingnya analisis lebih lanjut mengenai hubungan kadar Pb darah dengan pertumbuhan dan perkembangan anak.

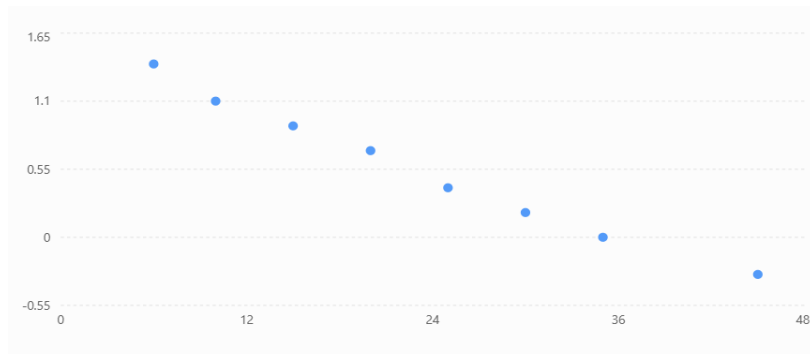
Uji Normalitas Data

Sebelum dilakukan analisis korelasi dan regresi, distribusi data diuji menggunakan uji Shapiro–Wilk karena jumlah sampel penelitian kurang dari 200 responden. Hasil uji normalitas menunjukkan bahwa kadar timbal darah, skor pertumbuhan, dan skor perkembangan memiliki nilai $p > 0,05$ sehingga seluruh variabel berdistribusi normal. Oleh karena itu, analisis hubungan antarvariabel dilakukan menggunakan uji korelasi Pearson dan regresi linier berganda.

Tabel 3. Hasil Uji Normalitas Shapiro–Wilk

Variabel	Statistik Shapiro–Wilk	p-value	Keterangan
Kadar Pb darah	0,981	0,087	Normal
Skor pertumbuhan	0,976	0,063	Normal
Skor perkembangan	0,984	0,114	Normal

Berdasarkan hasil uji Shapiro–Wilk, seluruh variabel memiliki nilai $p > 0,05$ yang menunjukkan bahwa data berdistribusi normal. Dengan demikian, uji normalitas untuk penggunaan uji korelasi Pearson dan regresi linier berganda telah terpenuhi.



Gambar Scatterplot kadar timbal darah dengan pertumbuhan

Pemeriksaan scatterplot menunjukkan adanya hubungan linier negatif antara kadar timbal darah dengan skor pertumbuhan anak. Semakin tinggi kadar timbal darah, semakin rendah skor pertumbuhan yang diperoleh. Sebaran titik data tidak menunjukkan pola kurvilinear maupun heteroskedastisitas yang bermakna sehingga linearitas untuk analisis Pearson dan regresi linier dinilai terpenuhi.

Tabel 4. Analisis Korelasi Pearson

Hubungan	R	p-value	Interpretasi
Pb darah & pertumbuhan	-0,312	0,015	Signifikan
Pb darah & perkembangan	-0,298	0,021	Signifikan

Berdasarkan Tabel 4, hasil analisis korelasi Pearson menunjukkan bahwa terdapat hubungan negatif yang signifikan antara kadar timbal (Pb) darah dengan pertumbuhan dan perkembangan anak. Hubungan antara kadar Pb darah dan pertumbuhan anak memiliki koefisien korelasi sebesar $r=-0,312$ dengan nilai $p=0,051$. Hasil ini menunjukkan adanya korelasi negatif dengan kekuatan hubungan yang lemah dan bermakna secara statistik.

Sementara itu, hubungan antara kadar Pb darah dan perkembangan anak menunjukkan koefisien korelasi sebesar $r=-0,298$ dengan nilai $p = 0,021$. Hasil tersebut juga menunjukkan korelasi negatif dengan kekuatan hubungan yang lemah dan bermakna secara statistik.

Tabel 5. Analisis Regresi Linier Berganda

Variabel	B	95% CI	p-value	Keterangan
Pb darah	-0,287	(-0,522 s/d -0,053)	0,018	Signifikan
Status gizi buruk	-0,845	(-1,362 s/d -0,328)	0,002	Signifikan

Berdasarkan Tabel 5, hasil analisis regresi linier berganda menunjukkan bahwa kadar timbal (Pb) darah berhubungan secara signifikan dengan pertumbuhan anak setelah memperhitungkan variabel lain dalam model. Variabel kadar Pb darah memiliki koefisien regresi (β) sebesar $-0,287$ dengan interval kepercayaan 95% antara $-0,522$ hingga $-0,053$ dan nilai $p=0,018$. Hasil ini menunjukkan hubungan negatif yang bermakna secara statistik, yaitu peningkatan kadar Pb darah berkaitan dengan penurunan nilai variabel pertumbuhan yang dianalisis, dengan asumsi pengodean variabel sesuai dengan interpretasi tersebut.

Selain itu, variabel status gizi buruk memiliki koefisien regresi sebesar $-0,845$ dengan interval kepercayaan 95% antara $-1,362$ hingga $-0,328$ dan nilai $p=0,002$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa status gizi buruk juga berhubungan secara signifikan dengan penurunan nilai variabel pertumbuhan anak dalam model regresi.

PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh anak yang tinggal di sekitar kawasan peleburan logam informal di Desa Pesarean memiliki kadar timbal darah di atas ambang batas aman WHO ($<5 \mu\text{g/dL}$). Temuan ini menunjukkan adanya paparan lingkungan kronis yang serius dan berpotensi menyebabkan dampak kesehatan jangka panjang pada anak. Organisasi Kesehatan Dunia menyebutkan bahwa anak merupakan kelompok paling rentan terhadap paparan timbal karena sistem saraf pusat, sistem imun, dan mekanisme detoksifikasi tubuh anak masih berada dalam tahap perkembangan. Selain itu, tingkat absorpsi timbal pada saluran cerna anak dapat mencapai 40–50%, jauh lebih tinggi dibandingkan orang dewasa yang hanya sekitar 10–15%.^{1,2} Kondisi tersebut menyebabkan akumulasi timbal dalam darah, jaringan tulang, dan sistem saraf menjadi lebih cepat terjadi pada anak usia dini.

Tingginya kadar Pb darah pada seluruh subjek penelitian menunjukkan bahwa aktivitas peleburan logam rumah tangga di wilayah penelitian kemungkinan besar telah mencemari lingkungan sekitar secara luas. Industri informal seperti peleburan aki bekas dan pengolahan logam tanpa pengelolaan limbah yang baik diketahui menghasilkan emisi debu timbal yang dapat mencemari udara, tanah, dan sumber air masyarakat. Partikel timbal berukuran kecil dapat bertahan lama di udara dan masuk ke tubuh melalui inhalasi maupun ingestion. Anak-anak memiliki risiko pajanan lebih tinggi karena sering bermain di tanah terbuka, memasukkan tangan atau benda ke mulut (hand-to-mouth behavior), serta memiliki kebiasaan higienitas yang belum optimal.^{3,4} Penelitian terbaru di kawasan industri Asia menunjukkan bahwa anak yang tinggal kurang dari 1 km dari area peleburan logam memiliki kadar Pb darah 2–3 kali lebih tinggi dibandingkan anak yang tinggal di wilayah non-industri.⁵

Penelitian ini menemukan hubungan negatif signifikan antara kadar timbal darah dengan pertumbuhan anak, terutama pada indikator tinggi badan menurut umur (TB/U). Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kadar timbal darah berkaitan dengan peningkatan risiko stunting pada anak. Timbal diketahui menghambat pertumbuhan linear melalui berbagai mekanisme biologis, salah satunya gangguan metabolisme kalsium dan vitamin D yang berperan penting dalam pembentukan tulang. Timbal dapat menggantikan ion kalsium dalam matriks tulang sehingga menyebabkan gangguan mineralisasi dan pertumbuhan tulang panjang.^{6,7} Selain itu,

timbal juga dapat menghambat aktivitas osteoblas dan mempercepat proses stres oksidatif pada jaringan tulang sehingga pertumbuhan anak menjadi tidak optimal.

Paparan timbal juga memengaruhi pertumbuhan melalui gangguan sistem hematologi. Timbal menghambat aktivitas enzim delta-aminolevulinic acid dehydratase (ALAD) dan ferrochelataze dalam proses sintesis hemoglobin. Hambatan tersebut menyebabkan anemia kronis akibat penurunan pembentukan hemoglobin. Kondisi anemia menyebabkan distribusi oksigen ke jaringan tubuh menjadi tidak optimal sehingga menghambat metabolisme sel dan pertumbuhan jaringan anak.⁸ Penelitian kohort terbaru melaporkan bahwa anak dengan kadar Pb darah tinggi memiliki risiko stunting 1,8–2,5 kali lebih besar dibandingkan anak dengan kadar Pb rendah, terutama pada kelompok usia balita yang mengalami kekurangan zat besi dan kalsium.⁹

Selain berdampak pada pertumbuhan fisik, penelitian ini menunjukkan adanya hubungan negatif signifikan antara kadar timbal darah dengan perkembangan anak. Temuan tersebut memperkuat bukti bahwa timbal merupakan neurotoksik kuat yang dapat mengganggu perkembangan neurologis anak usia dini. Timbal dapat menembus sawar darah otak dan terakumulasi pada area korteks prefrontal, hipokampus, dan serebelum yang berperan penting dalam fungsi memori, konsentrasi, kontrol emosi, serta koordinasi motorik.^{10,11} Paparan timbal kronis diketahui menyebabkan stres oksidatif, inflamasi neuron, gangguan mielinisasi, serta penurunan plastisitas sinaps pada otak anak yang sedang berkembang.

Secara fisiologis, timbal dapat mengganggu fungsi neurotransmitter seperti dopamin, glutamat, dan gamma aminobutyric acid (GABA). Gangguan neurotransmitter tersebut berhubungan dengan keterlambatan bicara, gangguan motorik halus, hiperaktivitas, gangguan perhatian, serta penurunan kemampuan belajar pada anak.¹² Penelitian meta-analisis terbaru menunjukkan bahwa setiap peningkatan 5 µg/dL kadar Pb darah berkaitan dengan penurunan fungsi intelektual dan skor perkembangan anak secara signifikan.¹³ Bahkan, beberapa penelitian terbaru menunjukkan bahwa efek neurotoksik timbal masih dapat ditemukan pada kadar di bawah 10 µg/dL sehingga tidak terdapat batas aman paparan timbal bagi anak-anak.¹⁴

Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa status gizi buruk merupakan faktor yang berhubungan signifikan dengan gangguan pertumbuhan anak. Kondisi tersebut menunjukkan adanya efek sinergis antara malnutrisi dan paparan timbal. Anak dengan defisiensi zat besi, seng, dan kalsium cenderung memiliki absorpsi timbal lebih tinggi karena logam timbal menggunakan transporter mineral yang sama dengan zat gizi esensial di saluran cerna.¹⁵ Akibatnya, anak dengan status gizi buruk lebih rentan mengalami akumulasi timbal dan dampak toksik yang lebih berat dibandingkan anak dengan status gizi baik. Temuan ini menjelaskan mengapa intervensi gizi saja sering kali belum cukup efektif menurunkan prevalensi stunting apabila faktor pencemaran lingkungan tidak dikendalikan secara bersamaan.

Temuan penelitian ini memiliki implikasi penting terhadap kebijakan kesehatan masyarakat di Indonesia. Program percepatan penurunan stunting selama ini lebih banyak berfokus pada intervensi gizi spesifik dan sensitif seperti suplementasi, pemberian makanan tambahan, dan sanitasi dasar. Namun, faktor risiko lingkungan seperti pencemaran logam berat masih jarang menjadi fokus utama program kesehatan anak. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa paparan timbal kemungkinan menjadi faktor risiko tersembunyi yang berkontribusi terhadap tingginya angka stunting dan keterlambatan perkembangan anak di wilayah industri informal⁹. Oleh karena itu, pendekatan penanggulangan stunting perlu diperluas dengan memasukkan aspek kesehatan lingkungan dan pengendalian pencemaran industri.

Upaya pencegahan yang dapat dilakukan meliputi monitoring kadar Pb darah secara berkala pada kelompok rentan, pemeriksaan kualitas tanah dan air di sekitar kawasan industri, pengawasan aktivitas peleburan logam informal, serta edukasi masyarakat mengenai bahaya paparan timbal. Selain itu, pemberian suplementasi zat besi, kalsium, dan seng perlu diperkuat untuk menurunkan absorpsi timbal pada anak. Intervensi berbasis komunitas seperti peningkatan perilaku hidup bersih dan sehat, pengurangan paparan debu rumah tangga, serta penggunaan alat pelindung diri pada pekerja industri juga perlu dilakukan secara berkelanjutan.^{17,18}

Paparan timbal pada anak usia dini saat ini masih menjadi isu kesehatan lingkungan global yang mendapat perhatian serius karena dampaknya yang bersifat permanen terhadap pertumbuhan dan perkembangan anak. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa seluruh anak yang tinggal di sekitar kawasan peleburan logam informal memiliki kadar timbal darah di atas ambang batas referensi yang direkomendasikan oleh Centers for Disease Control and Prevention (CDC), yaitu 3,5 µg/dL. Temuan ini menunjukkan bahwa anak-anak di wilayah penelitian mengalami paparan timbal kronis yang cukup tinggi sehingga berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan jangka panjang. CDC menegaskan bahwa tidak terdapat kadar timbal darah yang benar-benar aman bagi anak karena bahkan paparan pada konsentrasi rendah sekalipun dapat menyebabkan gangguan fungsi neurologis, penurunan kemampuan belajar, dan gangguan perilaku.^{21,22}

Tingginya kadar timbal darah pada seluruh subjek penelitian memperlihatkan bahwa aktivitas peleburan logam rumah tangga di wilayah penelitian kemungkinan menjadi sumber utama pencemaran lingkungan. Aktivitas peleburan aki bekas, pengolahan logam tanpa sistem pengendalian emisi, serta pengelolaan limbah yang tidak memenuhi standar lingkungan diketahui menghasilkan partikel timbal yang dapat mencemari udara, tanah, debu rumah tangga, serta sumber air masyarakat. Paparan tersebut terjadi secara terus-menerus melalui inhalasi maupun ingestion sehingga menyebabkan akumulasi timbal dalam tubuh anak. Penelitian di berbagai negara berkembang

menunjukkan bahwa anak yang tinggal di sekitar kawasan pertambangan dan peleburan logam memiliki kadar timbal darah yang lebih tinggi dibandingkan anak yang tinggal jauh dari sumber pencemaran. Kondisi tersebut juga dilaporkan pada penelitian di Indonesia yang menemukan bahwa anak yang tinggal di sekitar kawasan pertambangan timah memiliki kadar timbal darah yang berhubungan signifikan dengan kejadian stunting.^{9,23,24}

Hubungan negatif antara kadar timbal darah dan pertumbuhan anak yang ditemukan dalam penelitian ini memperkuat bukti bahwa paparan logam berat merupakan salah satu determinan penting stunting berbasis lingkungan. Selama ini stunting lebih banyak dikaitkan dengan faktor gizi, infeksi, dan sanitasi, namun berbagai penelitian terbaru menunjukkan bahwa faktor lingkungan juga memiliki kontribusi yang signifikan. Timbal dapat mengganggu metabolisme kalsium, fosfor, dan vitamin D yang berperan penting dalam proses pembentukan tulang dan pertumbuhan linear anak. Timbal diketahui dapat menggantikan ion kalsium dalam jaringan tulang sehingga menghambat proses mineralisasi tulang dan mengganggu aktivitas osteoblas. Akibatnya, pertumbuhan tinggi badan anak menjadi tidak optimal dan meningkatkan risiko terjadinya stunting pada usia balita. Selain itu, paparan timbal kronis juga meningkatkan pembentukan Reactive Oxygen Species (ROS) yang menyebabkan stres oksidatif dan kerusakan seluler pada jaringan tulang serta organ metabolik lainnya.^{9,10,25}

Selain mempengaruhi metabolisme tulang, timbal juga berperan dalam gangguan sistem hematologi yang berkontribusi terhadap hambatan pertumbuhan. Timbal menghambat aktivitas enzim delta-Amino Levulinic Acid Dehydratase (ALAD) dan ferrochelataze yang diperlukan dalam sintesis hemoglobin. Gangguan pembentukan hemoglobin menyebabkan anemia kronis yang berdampak pada penurunan distribusi oksigen ke jaringan tubuh. Kondisi tersebut menghambat metabolisme sel, menurunkan efisiensi penggunaan energi, dan akhirnya mengganggu pertumbuhan jaringan pada anak. Pada kelompok anak yang mengalami kekurangan zat besi, efek toksik timbal cenderung lebih berat karena absorpsi timbal di saluran cerna meningkat akibat penggunaan transporter mineral yang sama. Oleh karena itu, hubungan antara stunting dan paparan timbal sering kali diperkuat oleh adanya masalah malnutrisi yang terjadi secara bersamaan pada anak-anak di negara berkembang.^{8,11,26}

Penelitian ini juga menemukan adanya hubungan negatif yang signifikan antara kadar timbal darah dan perkembangan anak. Temuan tersebut sejalan dengan berbagai penelitian internasional yang menyatakan bahwa timbal merupakan neurotoksik kuat yang dapat memengaruhi perkembangan otak sejak usia dini. Timbal mampu menembus sawar darah otak dan terakumulasi pada berbagai area penting seperti hipokampus, korteks prefrontal, dan serebelum. Area tersebut berperan dalam proses memori, kemampuan belajar, konsentrasi, fungsi eksekutif, serta koordinasi motorik. Akumulasi timbal pada jaringan saraf menyebabkan gangguan mielinisasi, inflamasi neuron, stres oksidatif, serta perubahan fungsi neurotransmitter yang berujung pada keterlambatan perkembangan anak.^{12,13,27}

Secara fisiologis, timbal diketahui mengganggu fungsi neurotransmitter dopamin, glutamat, dan Gamma Amino Butyric Acid (GABA) yang berperan dalam proses pembelajaran dan perkembangan perilaku. Gangguan neurotransmitter tersebut dapat menyebabkan keterlambatan bicara, gangguan motorik halus, kesulitan konsentrasi, hiperaktivitas, serta penurunan kemampuan intelektual pada anak. Meta-analisis terbaru menunjukkan bahwa peningkatan kadar timbal darah bahkan pada konsentrasi rendah masih berkaitan dengan penurunan skor perkembangan kognitif dan fungsi akademik anak. Efek tersebut bersifat kumulatif dan dapat berlangsung hingga masa remaja maupun dewasa sehingga berdampak terhadap kualitas sumber daya manusia dalam jangka panjang.^{13,14,28}

Temuan penelitian ini memiliki implikasi penting terhadap program percepatan penurunan stunting di Indonesia. Selama ini intervensi stunting lebih banyak berfokus pada perbaikan gizi, suplementasi, imunisasi, dan sanitasi dasar. Namun hasil penelitian ini menunjukkan bahwa faktor pencemaran lingkungan, khususnya paparan timbal, juga perlu menjadi perhatian dalam upaya pencegahan stunting. Tanpa pengendalian sumber pencemaran lingkungan, perbaikan status gizi saja kemungkinan tidak cukup untuk mengatasi masalah stunting secara optimal pada masyarakat yang tinggal di sekitar kawasan industri informal. Oleh karena itu, pendekatan multisektor yang mengintegrasikan kesehatan lingkungan, pengendalian pencemaran industri, perbaikan gizi, dan edukasi masyarakat perlu dikembangkan sebagai strategi penanggulangan stunting berbasis risiko lingkungan.^{16,23,29}

Dari perspektif kesehatan masyarakat, hasil penelitian ini mendukung pentingnya program skrining kadar timbal darah pada kelompok rentan yang tinggal di sekitar kawasan industri peleburan logam. Pemeriksaan berkala kadar timbal darah dapat digunakan sebagai upaya deteksi dini sehingga intervensi kesehatan dapat dilakukan sebelum terjadi kerusakan neurologis permanen. Selain itu, pemantauan kualitas lingkungan seperti kadar timbal pada tanah, air, debu rumah tangga, dan udara ambien juga perlu dilakukan secara rutin untuk mengidentifikasi sumber pencemaran yang paling dominan. Penguatan regulasi terhadap industri informal, peningkatan kepatuhan terhadap standar lingkungan, serta edukasi mengenai perilaku hidup bersih dan sehat menjadi langkah penting dalam mengurangi paparan timbal pada anak-anak di wilayah berisiko tinggi.^{4,16,22,29}

Hasil penelitian ini menunjukkan rerata kadar Pb darah anak sebesar $22,64 \pm 12,34$ µg/dL, yang jauh melebihi nilai referensi CDC sebesar 3,5 µg/dL. Temuan ini mengindikasikan bahwa anak-anak yang tinggal di sekitar industri peleburan logam informal mengalami paparan kronis yang cukup tinggi. Nilai tersebut juga lebih tinggi dibandingkan hasil penelitian di Bangladesh yang melaporkan rerata kadar Pb darah anak sebesar 12,1 µg/dL pada wilayah industri daur ulang aki bekas, serta lebih tinggi dibandingkan penelitian di India yang menemukan

rerata kadar Pb darah sebesar 15,8 µg/dL pada anak yang tinggal di sekitar kawasan peleburan logam. Perbedaan ini menunjukkan bahwa kondisi lingkungan di lokasi penelitian kemungkinan memiliki tingkat pencemaran yang lebih berat akibat lemahnya pengelolaan limbah dan rendahnya penerapan prinsip keselamatan lingkungan pada industri rumah tangga.^{23, 24, 30}

Temuan bahwa seluruh anak memiliki kadar Pb darah di atas batas aman menunjukkan adanya paparan yang berlangsung secara terus-menerus. Menurut WHO, paparan timbal pada anak tidak hanya berasal dari udara yang tercemar, tetapi juga dapat berasal dari debu rumah tangga, tanah, makanan, air minum, serta kontaminasi yang terbawa oleh pakaian pekerja industri ke dalam rumah tangga. Pada kawasan peleburan logam informal, proses pembakaran dan peleburan sering dilakukan tanpa sistem filtrasi emisi sehingga partikel timbal dapat menyebar ke lingkungan sekitar dan menetap dalam tanah selama bertahun-tahun. Kondisi ini menyebabkan anak-anak mengalami paparan kronis bahkan ketika mereka tidak berada secara langsung di lokasi industri.^{22, 29}

Hubungan antara kadar Pb darah dan pertumbuhan anak yang ditemukan dalam penelitian ini memperkuat konsep environmental enteropathy dan environmental toxic exposure sebagai faktor risiko stunting. Selama ini sebagian besar program penurunan stunting berfokus pada intervensi gizi, padahal berbagai penelitian menunjukkan bahwa paparan logam berat juga berkontribusi terhadap hambatan pertumbuhan. Timbal dapat mengganggu sintesis hormon pertumbuhan (growth hormone), insulin-like growth factor-1 (IGF-1), serta metabolisme vitamin D yang berperan penting dalam proses pembentukan tulang. Gangguan pada jalur hormonal tersebut menyebabkan perlambatan pertumbuhan linear sehingga anak lebih berisiko mengalami stunting. Penelitian kohort di China melaporkan bahwa anak dengan kadar Pb darah tinggi memiliki tinggi badan yang secara signifikan lebih rendah dibandingkan dengan kelompok kadar Pb darah rendah setelah dikontrol terhadap faktor sosial ekonomi dan asupan nutrisi.^{10, 25, 31}

Selain melalui mekanisme hormonal, timbal juga berperan dalam meningkatkan stres oksidatif sistemik. Paparan timbal merangsang pembentukan radikal bebas yang menyebabkan kerusakan membran sel, gangguan fungsi mitokondria, serta peningkatan proses inflamasi kronis. Kondisi tersebut dapat menghambat proliferasi sel tulang dan jaringan tubuh yang sedang tumbuh. Stres oksidatif yang berlangsung dalam jangka panjang juga berkontribusi terhadap gangguan metabolisme energi sehingga pertumbuhan anak menjadi kurang optimal. Beberapa penelitian eksperimental menunjukkan bahwa peningkatan biomarker stres oksidatif ditemukan secara konsisten pada anak dengan kadar Pb darah tinggi.^{25, 32}

Hubungan signifikan antara kadar Pb darah dan perkembangan anak pada penelitian ini sejalan dengan teori neurodevelopmental toxicity. Pada masa awal kehidupan, otak mengalami proses perkembangan yang sangat cepat sehingga lebih rentan terhadap berbagai zat toksik lingkungan. Timbal diketahui dapat mengganggu migrasi neuron, pembentukan sinaps, proses mielinisasi, serta perkembangan jaringan korteks serebral. Kerusakan yang terjadi pada periode kritis perkembangan otak dapat menyebabkan dampak jangka panjang berupa penurunan kecerdasan, gangguan memori, kesulitan belajar, dan gangguan perilaku. Efek tersebut sering kali bersifat irreversible sehingga pencegahan paparan menjadi strategi yang jauh lebih efektif dibandingkan pengobatan setelah terjadi kerusakan neurologis.^{12, 13, 27}

Penelitian meta-analisis terbaru menunjukkan bahwa peningkatan kadar Pb darah sebesar 5 µg/dL berhubungan dengan penurunan skor IQ anak sebesar 1–3 poin. Meskipun penurunan tersebut tampak kecil pada tingkat individu, dampaknya menjadi sangat besar pada tingkat populasi karena dapat menurunkan kualitas sumber daya manusia secara keseluruhan. Oleh karena itu, WHO dan UNICEF menempatkan paparan timbal sebagai salah satu ancaman lingkungan utama terhadap perkembangan anak di negara berkembang.^{22, 27, 29}

Faktor sosial ekonomi kemungkinan juga berperan dalam memperkuat dampak paparan timbal pada anak di wilayah penelitian. Anak yang berasal dari keluarga dengan tingkat pendidikan rendah atau pendapatan rendah umumnya memiliki risiko lebih tinggi mengalami paparan lingkungan karena tinggal lebih dekat dengan sumber pencemaran dan memiliki akses yang lebih terbatas terhadap layanan kesehatan. Selain itu, kondisi sosial ekonomi yang rendah sering kali berkaitan dengan kualitas asupan gizi yang kurang baik sehingga meningkatkan absorpsi timbal di saluran cerna. Interaksi antara paparan timbal, malnutrisi, dan kemiskinan dapat menciptakan siklus kerentanan yang memperburuk status kesehatan anak secara keseluruhan.^{11, 26, 33}

Temuan penelitian ini memiliki implikasi strategis terhadap program percepatan penurunan stunting di Indonesia. Selama ini indikator keberhasilan program stunting lebih banyak berfokus pada perbaikan konsumsi pangan dan pelayanan kesehatan ibu-anak. Namun hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengendalian faktor lingkungan juga perlu menjadi bagian integral dalam strategi pencegahan stunting. Pendekatan multisektor yang melibatkan sektor kesehatan, lingkungan hidup, pendidikan, dan pemerintah daerah diperlukan untuk mengurangi paparan timbal pada masyarakat yang tinggal di sekitar kawasan industri informal. Upaya tersebut dapat dilakukan melalui pengawasan emisi industri, pemantauan kualitas lingkungan secara berkala, skrining kadar Pb darah pada kelompok rentan, serta edukasi masyarakat mengenai bahaya paparan logam berat.^{16, 22, 29}

Hasil penelitian ini semakin memperkuat konsep bahwa stunting dan keterlambatan perkembangan anak merupakan masalah multidimensional yang tidak hanya dipengaruhi oleh faktor gizi, tetapi juga oleh faktor lingkungan. Oleh karena itu, keberhasilan program pembangunan sumber daya manusia Indonesia memerlukan integrasi antara intervensi gizi, pengendalian pencemaran lingkungan, peningkatan kualitas sanitasi, dan

perlindungan kesehatan anak dari berbagai paparan toksik yang dapat menghambat tumbuh kembang secara optimal.

Penelitian ini memiliki nilai kebaruan karena mengevaluasi hubungan kadar timbal darah dengan pertumbuhan dan perkembangan anak pada kawasan peleburan logam rumah tangga di Kabupaten Tegal yang masih sangat terbatas diteliti di Indonesia. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih banyak dilakukan pada kawasan industri besar atau wilayah perkotaan. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa industri informal skala rumah tangga juga memiliki dampak serius terhadap kesehatan anak dan berpotensi menjadi faktor risiko stunting berbasis lingkungan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan kebijakan kesehatan lingkungan, penguatan regulasi industri informal, serta program pencegahan stunting berbasis risiko lingkungan di Indonesia.

KETERBATASAN PENELITIAN

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Desain cross-sectional tidak dapat memastikan hubungan kausalitas secara langsung. Penelitian juga belum melakukan pemeriksaan kadar timbal pada media lingkungan seperti tanah, air, dan udara. Selain itu, faktor asupan nutrisi harian anak belum dievaluasi secara mendalam.

SIMPULAN

Kadar timbal darah yang tinggi berhubungan signifikan dengan gangguan pertumbuhan dan perkembangan anak usia balita di kawasan industri peleburan logam informal Kabupaten Tegal. Paparan timbal merupakan faktor risiko independen yang dapat memperburuk status kesehatan anak. Penguatan program kesehatan lingkungan, pemantauan kadar timbal darah, edukasi masyarakat, dan intervensi gizi perlu dilakukan secara terpadu untuk mencegah dampak jangka panjang pada anak.

DAFTAR PUSTAKA

1. World Health Organization. Childhood Lead Poisoning. Geneva: World Health Organization; 2023.
2. World Health Organization. Lead Poisoning and Health. Geneva: World Health Organization; 2024.
3. United Nations Children's Fund (UNICEF). The Toxic Truth: Children's Exposure to Lead Pollution Undermines a Generation of Future Potential. New York: UNICEF; 2020.
4. Jain A, Meena P, Agarwal N. Environmental exposure to lead and its impact on children's health: a systematic review. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2022;29(15):22345-22358. doi:10.1007/s11356-021-18381-5.
5. Sanders T, Liu Y, Buchner V, Tchounwou PB. Neurotoxic effects and biomarkers of lead exposure: a review. *Rev Environ Health*. 2009;24(1):15-45. <https://doi.org/10.1515/REVEH.2009.24.1.15>
6. Flora G, Gupta D, Tiwari A. Toxicity of lead: a review with recent updates. *Interdiscip Toxicol*. 2012;5(2):47-58. <https://doi.org/10.2478/v10102-012-0009-2>
7. Mansyur M, Fitriani DY, Prayogo A. Determinant factors of children's blood lead levels in Java, Indonesia. *Int J Hyg Environ Health*. 2024;261:114426. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2024.114426>
8. Lestari I, Soesilo TEB, Agustina H. The effects of lead contamination in public health case: Pesarean Village, Tegal District, Indonesia. 2018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186803012>
9. Zarmawi R, Haryanto B. The association of children's blood lead levels and prevalence of stunting in tin mining area in Indonesia. *Ann Glob Health*. 2023;89(1):55. doi:10.5334/aogh.4119. <https://doi.org/10.5334/aogh.4119>
10. Liu J, Ai Y, McCauley L, Pinto-Martin J. Blood lead levels and child growth outcomes: evidence from a longitudinal cohort study in China. *Sci Total Environ*. 2022;806:150512. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150512>
11. Zheng Y, Wang Y, Zhang Y, Li Y. Environmental metal exposure and growth to 10 years of age: a prospective cohort study. *Sci Total Environ*. 2021;771:144717. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144717>
12. Dórea JG. Environmental exposure to low-level lead and neurodevelopment in children: a review. *Environ Res*. 2022;204:112074. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112074>
13. Córdoba-Gamboa L, Valencia-Ramírez LC, Rodríguez-Villamizar LA, et al. Lead exposure can affect early childhood development and intelligence: a systematic review and meta-analysis. *Int J Environ Res Public Health*. 2023;20(6):5174. <https://doi.org/10.3390/ijerph20065174>
14. Pennington AF, Smith MR, Ebba EK, et al. Effects of blood lead levels in school-age children and adolescents: a scoping review. *Pediatrics*. 2024;154(Suppl 2):e2024067808F. <https://doi.org/10.1542/peds.2024-067808F>
15. Rahman A, Kumarathasan P, Gomes J. Assessment of childhood lead exposure in battery recycling communities: a systematic review. *Environ Res*. 2022;214:113815. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113815>

16. Bae S, Lim YH, Hong YC. Nutritional factors and blood lead concentrations in children. *Nutrients*. 2021;13(2):512. <https://doi.org/10.3390/nu13020512>
17. Pure Earth. Breaking the Cycle of Extreme Lead Poisoning in Pesarean, Indonesia. New York: Pure Earth; 2024.
18. Pemerintah Kabupaten Tegal. Peraturan Bupati Tegal Nomor 71 Tahun 2023 tentang Rencana Aksi Pengurangan Keracunan Timbal pada Anak Tahun 2023-2027. Tegal: Pemerintah Kabupaten Tegal; 2023.
19. Dinas Kesehatan Kabupaten Tegal. Profil Kesehatan Kabupaten Tegal Tahun 2024. Tegal: Dinas Kesehatan Kabupaten Tegal; 2025.
20. Ericson B, Caravanos J, Taylor MP, et al. The global burden of lead toxicity attributable to informal used lead-acid battery recycling. *Ann Glob Health*. 2021;87(1):55. doi:10.5334/aogh.3300.
21. Centers for Disease Control and Prevention. Blood Lead Reference Value Updates. Atlanta: CDC; 2024.
22. World Health Organization. Our Children's Future: A Call to End Childhood Lead Poisoning. Geneva: World Health Organization; 2023.
23. Obeng-Gyasi E. Sources of lead exposure in various countries. *Rev Environ Health*. 2021;36(1):25-34. <https://doi.org/10.1515/reveh-2020-0037>
24. Kordas K, Ravenscroft J, Cao Y, McLean EV. Lead exposure in low- and middle-income countries: perspectives and lessons. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(19):12345.
25. Mitra P, Sharma S, Purohit P, Sharma P. Clinical and molecular aspects of lead toxicity: an update. *Crit Rev Clin Lab Sci*. 2023;60(2):89-105.
26. Al-Saleh I, Coskun S, Mashhour A, et al. Oxidative stress biomarkers associated with lead exposure in children. *Biol Trace Elem Res*. 2021;199(8):2870-2879. doi:10.1007/s12011-020-02440-5.
27. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. Pedoman Pelaksanaan Stimulasi, Deteksi dan Intervensi Dini Tumbuh Kembang Anak (SDIDTK). Jakarta: Kementerian Kesehatan RI; 2022.
28. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. Buku Kesehatan Ibu dan Anak (KIA). Jakarta: Kementerian Kesehatan RI; 2024.
29. World Health Organization. WHO Child Growth Standards. Geneva: World Health Organization; 2024.
30. Elfira D, Ramadhanti P, Ningsih SA, Khadijah. Deteksi Tumbuh Kembang Anak Menggunakan KPSP. *Jurnal Pendidikan dan Konseling*. 2022;4(3):2530-2538.
31. Katili RA, Irwan, Anwar AI, Mokodompis Y. Optimization of the Implementation of Early Intervention Detection Stimulation for Growth and Development (SDIDTK) in Toddlers with the Developmental Pre-Screening Questionnaire (KPSP) Towards Village Midwives. *Jambura Journal of Health Sciences and Research*. 2025;7(1):220-230.
32. Centers for Disease Control and Prevention. Recommended Actions Based on Blood Lead Level. Atlanta: CDC; 2025.
33. Centers for Disease Control and Prevention. Testing for Lead Poisoning in Children. Atlanta: CDC; 2025.
34. Pure Earth. Indonesia: Developing Remediation Designs for Lead Contamination in Pesarean Village, Tegal. New York: Pure Earth; 2024.