

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan dan perkembangan anak merupakan indikator fundamental yang mencerminkan tingkat kesehatan, kesejahteraan, dan kualitas sumber daya manusia di suatu populasi. Pertumbuhan yang optimal sangat bergantung pada keseimbangan faktor gizi, kesehatan, dan lingkungan. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) menegaskan bahwa gangguan terhadap faktor-faktor ini dapat menimbulkan konsekuensi jangka panjang, seperti hambatan pertumbuhan (*growth retardation*), gangguan kognitif, serta peningkatan risiko penyakit kronis di masa dewasa (Richter et al., 2018)(Khomenko et al., 2021). Salah satu determinan lingkungan yang semakin mendapat perhatian adalah paparan logam berat, khususnya kadmium (Cd) dan timbal (Pb).

Kedua logam ini bersifat toksik dan dapat mengganggu proses biologis normal melalui mekanisme dalam jaringan tubuh, sehingga menimbulkan berbagai efek kesehatan jangka panjang, terutama pada anak-anak yang sistem detoksifikasinya belum berkembang sempurna (Kadawathagedara et al., 2018)(Asadollahy et al., 2018). Anak jalanan merupakan kelompok populasi yang sangat rentan terhadap berbagai risiko kesehatan akibat paparan lingkungan yang buruk. Secara global, UNICEF memperkirakan terdapat lebih dari 150 juta anak jalanan di seluruh dunia, terutama di negara berkembang dengan kondisi sosial ekonomi rendah dan tingkat urbanisasi tinggi (UNICEF, 2021).

Anak jalanan hidup dan beraktivitas di ruang publik tanpa perlindungan memadai, dengan akses terbatas terhadap gizi, air bersih, dan layanan kesehatan (Luyten et al., 2018; Abekah Carter, 2024). Di Indonesia, data Kementerian Sosial (2023) menunjukkan terdapat sekitar 115.000 anak jalanan yang tersebar di kota besar seperti Jakarta, Surabaya, dan Makassar, mencerminkan persoalan sosial dan ekonomi yang kompleks (Thahir et al., 2023). Kondisi hidup di jalan membuat anak-anak ini lebih sering terpapar polusi udara dan debu jalanan yang mengandung logam berat, terutama di area dengan kepadatan lalu lintas tinggi.

Kota Makassar, sebagai pusat pertumbuhan ekonomi Indonesia timur, menghadapi tantangan dengan keberadaan anak jalanan yang masih menjadi persoalan utama (Mardiana et al., 2021). Menurut sumber Satu Data Kota Makassar (2024), jumlah anak jalanan tercatat sebanyak 501 orang pada tahun 2022 dan tersebar wilayah strategis seperti Jalan Somba Opu, Pantai Losari, dan Terminal Daya. Hal ini menunjukkan bahwa anak jalanan di Makassar merupakan populasi yang menghadapi risiko kesehatan ganda, baik dari aspek sosial ekonomi maupun dari paparan lingkungan beracun yang terus-menerus.

Risiko kesehatan yang signifikan akibat paparan polutan lingkungan berdampak langsung terhadap anak jalanan, terutama karena paparan logam berat seperti kadmium (Cd) dan timbal (Pb) yang berasal dari emisi kendaraan bermotor, aktivitas industri, serta limbah perkotaan yang umum ditemukan di wilayah padat lalu lintas seperti Kota Makassar. (Khomenko et al., 2021b)(Ara et al., 2019). Paparan yang

meningkat terhadap polutan menimbulkan ancaman yang cukup besar karena dapat menyebabkan berbagai risiko Kesehatan terutama gangguan pertumbuhan dan perkembangan jangka Panjang yang secara efektif menciptakan siklus kemiskinan dan kesenjangan kesehatan yang sulit diatasi (Uikey et al., 2021).

Logam berat dapat secara signifikan memperburuk status kesehatan masyarakat, terutama pada anak-anak yang tinggal di wilayah dengan keterbatasan sumber daya dan infrastruktur, seperti Kota Makassar, di mana tingginya mobilitas kendaraan bermotor berkontribusi terhadap peningkatan paparan terhadap zat-zat beracun di lingkungan. (Pinoeiro et al., 2021)(Widyawati et al., 2020)(Chwalba et al., 2023a)(Peters et al., 2021)(Samadhi et al., 2022). Walaupun penggunaan bensin bertimbal telah dihapus secara global, keberadaan kendaraan lama yang masih menggunakan bahan bakar bertimbal tetap menjadi sumber emisi potensial dan berperan dalam peningkatan konsentrasi logam berat di udara perkotaan(Chatterjee & Kortenkamp, 2022). Selain itu, pelepasan timbal yang berasal dari bantalan rem dan keausan ban kendaraan juga menjadi sumber risiko tambahan, karena proses gesekan tersebut menghasilkan partikel halus yang mengandung timbal dan berpotensi terhirup oleh manusia (Bobzien, 2023). Emisi kadmium sering kali dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar fosil, khususnya oleh kendaraan bermotor dengan sistem konverter katalitik yang tidak berfungsi optimal. Ketidakefisienan alat ini menyebabkan logam berat, termasuk kadmium, tidak sepenuhnya teroksidasi dan akhirnya terlepas ke atmosfer dalam bentuk partikel halus(Arruebarrena et al., 2023)(Zhou et al., 2023).

Di wilayah dengan tingkat kepadatan lalu lintas yang tinggi, berbagai studi kualitas udara menunjukkan peningkatan konsentrasi kadmium (Cd) dan timbal (Pb), yang menegaskan adanya hubungan positif antara kepadatan lalu lintas kendaraan bermotor dan tingkat polusi logam berat di atmosfer(Cheng et al., 2022)(Haddadi et al., 2024). Anak jalanan merupakan populasi yang sangat rentan terhadap paparan logam berat, konsekuensi kesehatan akibat pajanan kadmium (Cd) dan timbal (Pb) sangat serius, terutama pada anak-anak yang masih berada dalam masa pertumbuhan. Paparan kronis terhadap kedua logam ini dapat menyebabkan gangguan pertumbuhan pada anak(Ghodousi et al., 2017)

Polusi udara perkotaan, terutama yang disebabkan oleh logam berat seperti timbal (Pb) dan kadmium (Cd), menimbulkan risiko kesehatan yang serius bagi populasi rentan, termasuk anak jalanan di wilayah padat penduduk seperti Kota Makassar. Di lingkungan perkotaan dengan tingkat kepadatan lalu lintas yang tinggi, misalnya di area persimpangan jalan dan terminal angkutan umum, terjadi akumulasi partikel halus (PM_{2.5} dan PM₁₀) yang sangat mengkhawatirkan. Partikel-partikel ini sering mengandung logam berat berbahaya ketika terhirup secara terus-menerus, dapat meningkatkan risiko gangguan pertumbuhan dan perkembangan pada anak-anak jalanan. (Bobzien, 2023)(Gallagher et al., 2018). Penggunaan kendaraan berbahan bakar diesel dengan sistem pembakaran yang tidak efisien dapat meningkatkan konsentrasi logam berat berbahaya di atmosfer, terutama kadmium (Cd) dan timbal (Pb)(Jin et al., 2017)(Wu et al., 2016)

Implikasi kesehatan akibat paparan logam berat seperti kadmium (Cd) dan timbal (Pb) telah banyak dipublikasikan dalam berbagai penelitian. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa paparan timbal (Pb) dalam kadar yang sangat rendah dapat berdampak buruk terhadap perkembangan saraf anak dimana ditandai dengan penurunan IQ, gangguan perilaku, dan kesulitan belajar. Paparan kadmium (Cd) dikaitkan dengan gangguan pertumbuhan tulang akibat efek toksik kronisnya (Samadhi et al., 2022)(Sripada & Lager, 2022). Studi epidemiologis menunjukkan adanya hubungan yang signifikan antara paparan kedua logam beracun tersebut dengan berbagai gangguan kesehatan, termasuk gangguan perkembangan yakni gangguan perkembangan saraf (neurodevelopmental disorders) dan gangguan pertumbuhan akibat disrupsi hormonal (Madani-Tonekaboni et al., 2019)(Cowell et al., 2020). Anak jalanan yang tinggal di lingkungan perkotaan memiliki risiko paparan logam berat yang lebih tinggi dibandingkan dengan anak-anak di daerah pedesaan (H. He et al., 2022).

Kerentanan anak jalanan terhadap paparan logam berat berdampak pada kesehatan (Shin et al., 2024a). Implikasi paparan logam berat terhadap kesehatan anak sangat signifikan, terutama dalam memengaruhi perkembangan otak dan kesehatan fisik secara keseluruhan. Sejumlah penelitian menunjukkan secara konsisten bahwa anak-anak memiliki toleransi biologis yang lebih rendah terhadap polutan dibandingkan dengan orang dewasa karena tubuh mereka masih berada dalam fase pertumbuhan dan perkembangan. Kondisi ini menyebabkan anak-anak lebih rentan mengalami efek kesehatan non-karsinogenik akibat akumulasi logam berat di dalam tubuh (Samadhi et al., 2022), misalnya, paparan kadmium (Cd) dapat memicu stres oksidatif yang berdampak pada keterlambatan proses pertumbuhan dan perkembangan anak. (Ji et al., 2018; Samadhi et al., 2022; Sripada & Lager, 2022)(Sripada & Lager, 2022)(Ding, 2024). Selain itu, polusi udara di wilayah perkotaan berkontribusi secara signifikan terhadap peningkatan morbiditas dan mortalitas pada anak-anak. Kondisi ini menegaskan pentingnya pemahaman yang lebih mendalam mengenai dampak toksik lingkungan terhadap kelompok usia rentan tersebut. (Waters et al., 2021)(Egondi et al., 2018)

Peningkatan kekhawatiran terhadap penurunan kualitas udara perkotaan dan implikasinya terhadap kesehatan anak jalanan menuntut adanya upaya yang bersifat segera, sistematis, dan berbasis bukti ilmiah untuk memahami mekanisme paparan serta mengidentifikasi strategi mitigasi yang efektif. Pendekatan ini penting untuk meminimalkan risiko kesehatan jangka panjang akibat paparan polutan udara, sekaligus meningkatkan derajat kesehatan dan kualitas hidup anak jalanan sebagai kelompok populasi yang paling rentan terhadap dampak toksik lingkungan (Vaglia, 2019). Polusi logam berat yang berasal dari aktivitas lalu lintas perkotaan merupakan isu kesehatan masyarakat yang krusial, terutama bagi populasi rentan seperti anak-anak jalanan. Diperlukan penelitian yang berkelanjutan serta penerapan strategi intervensi yang komprehensif untuk menilai tingkat paparan dan mengembangkan langkah-langkah perlindungan yang efektif. Upaya tersebut penting guna

meminimalkan dampak kesehatan jangka panjang akibat paparan polutan lingkungan yang bersifat persisten dan toksik.

Pajanan logam berat, terutama kadmium (Cd) dan timbal (Pb), merupakan ancaman serius bagi kesehatan masyarakat, dengan dampak yang paling signifikan terjadi pada populasi rentan seperti anak jalanan di wilayah perkotaan. Kelompok ini kerap terpapar logam berat dalam konsentrasi tinggi akibat kontaminasi lingkungan yang berasal dari koridor transportasi padat serta kawasan industri di sekitarnya. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa anak-anak memiliki tingkat penyerapan logam berat yang lebih tinggi dibandingkan orang dewasa karena perbedaan fisiologis dan perilaku, seperti massa tubuh yang lebih kecil, laju metabolisme yang lebih cepat, serta kebiasaan beraktivitas di ruang terbuka yang meningkatkan risiko pajanan (Xiao et al., 2022)(Sadeghdoust et al., 2020)(Somsun et al., 2023). Risiko paparan yang meningkat ini memerlukan penelitian yang terarah untuk memahami dampaknya terhadap kesehatan mereka, khususnya di lingkungan perkotaan yang ramai. kadmium dan timbal memasuki tubuh anak dengan jalanan meliputi inhalasi, konsumsi makanan yang terkontaminasi, dan kontak langsung dengan tanah dan debu yang tercemar(Li & Liao, 2018) (Naimabadi et al., 2020)

Anak jalanan terlibat dalam aktivitas di dekat jalan raya di mana konsentrasi logam berat biasanya tinggi (Kao et al., 2024) Akumulasi pajanan logam berat dalam tubuh dari waktu ke waktu dapat menimbulkan berbagai efek kesehatan yang merugikan. Dampak tersebut dapat termanifestasi dalam bentuk gangguan perkembangan jangka pendek maupun jangka panjang, termasuk hambatan pertumbuhan, penurunan fungsi kognitif, serta peningkatan risiko terjadinya penyakit kronis pada tahap kehidupan selanjutnya (Danziger et al., 2022)(Pinoeiro et al., 2021)

Secara biomolekuler, dampak kadmium (Cd) dan timbal (Pb) terhadap proses pertumbuhan anak menunjukkan mekanisme toksik yang kompleks dan memprihatinkan. Kedua logam berat ini mengganggu fungsi hormonal yang berperan penting dalam regulasi pertumbuhan dan perkembangan. Kadmium diketahui dapat menghambat sekresi hormon pertumbuhan (*Growth Hormone*, GH) dari kelenjar pituitari, sehingga menurunkan kadar *Insulin-like Growth Factor-1* (IGF-1) yang berfungsi penting dalam pembentukan tulang dan jaringan otot (Chwalba et al., 2023a) Sebaliknya, timbal dapat mengganggu fungsi reseptor IGF-1, sehingga menurunkan efektivitas hormon tersebut dalam memfasilitasi proses pertumbuhan dan diferensiasi sel (Drag-Kozak et al., 2018)(Drag-Kozak et al., 2018). Gangguan biokimia ini diperburuk oleh munculnya stres oksidatif yang diinduksi oleh logam berat, yang meningkatkan pembentukan *Reactive Oxygen Species* (ROS). Kondisi tersebut dapat menyebabkan kerusakan pada DNA, protein, dan lipid seluler, serta menghambat ekspresi gen yang berperan dalam pertumbuhan, seperti *COL1A1* dan *COL2A1* (Naimabadi et al., 2020)(Faraji et al., 2019)

Selain itu, paparan logam berat juga memiliki konsekuensi nutrisi yang signifikan karena dapat mengganggu proses penyerapan dan metabolisme mineral esensial. Kadmium, misalnya, diketahui dapat merusak fungsi ginjal dan menurunkan produksi bentuk aktif vitamin D (*kalsitriol*), yang berperan penting dalam penyerapan kalsium.

Kekurangan vitamin D dan kalsium tersebut berkontribusi terhadap gangguan pertumbuhan tulang, peningkatan risiko osteoporosis, serta retardasi pertumbuhan pada anak (C. Huang et al., 2022a). Selain itu, kadmium juga dapat menghambat penyerapan zat besi dan seng, yang pada akhirnya menyebabkan anemia dan defisiensi mikronutrien. Timbal (Pb) pun memiliki mekanisme toksik serupa, yakni dengan bersaing terhadap zat besi pada proses pengikatan darah, sehingga menghambat sintesis hemoglobin dan memperparah kondisi anemia (Donangelo et al., 2021).

Secara longitudinal, paparan kadmium (Cd) dan timbal (Pb) pada masa kanak-kanak memiliki implikasi jangka panjang yang melampaui gangguan perkembangan akut. Anak-anak yang mengalami paparan logam berat sejak dini berisiko menghadapi konsekuensi sosial ekonomi di masa dewasa, yang tercermin dalam rendahnya pencapaian pendidikan dan keterbatasan akses terhadap kesempatan kerja (M. Kim et al., 2023). Efek kumulatif dari paparan logam berat tersebut tidak hanya menghambat pertumbuhan fisik, tetapi juga mengganggu perkembangan neurokognitif dan emosional, sehingga secara signifikan dapat mengubah lintasan kehidupan individu serta meningkatkan kerentanan terhadap berbagai penyakit kronis (Alfonso Mayén et al., 2022). Selain itu, paparan Cd dan Pb berpotensi menurunkan fungsi sistem imun melalui mekanisme imunotoksik, yang mengakibatkan peningkatan risiko infeksi serta gangguan homeostasis imun. Penurunan fungsi kekebalan tubuh ini dapat menimbulkan dampak jangka panjang terhadap status kesehatan dan kualitas hidup anak-anak jalanan yang terpapar secara kronis (P. Zhang et al., 2024).

Kadar kadmium (Cd) dalam darah pada populasi umum yang tidak terpapar umumnya berada pada kisaran 0,1–0,3 µg/L. Namun, pada pekerja industri atau individu dengan tingkat paparan tinggi, konsentrasinya dapat mencapai 1–3 µg/L atau lebih, dengan risiko kerusakan ginjal dan gangguan kesehatan lainnya apabila kadar melebihi 5 µg/L. Batas aman yang direkomendasikan secara internasional adalah di bawah 1 µg/L, dan nilai di atas ambang tersebut memerlukan pemantauan medis yang berkelanjutan. Kadmium dan timbal (Pb) merupakan dua logam berat dengan potensi toksisitas tinggi yang menimbulkan risiko kesehatan signifikan karena prevalensinya di lingkungan perkotaan dan kawasan industri. Konsentrasi kadmium di atmosfer wilayah padat penduduk atau kawasan industri dilaporkan berada pada rentang 0,001–0,02 µg/m³, dengan kemungkinan peningkatan sementara pada periode puncak aktivitas (Ahn et al., 2019). Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) merekomendasikan agar paparan tahunan rata-rata terhadap kadmium di udara tidak melebihi 0,005 µg/m³ guna meminimalkan konsekuensi kesehatan jangka panjang. Sebaliknya, konsentrasi timbal di udara daerah perkotaan dengan tingkat emisi lalu lintas yang tinggi umumnya bervariasi antara 0,01 dan 0,1 µg/m³, menunjukkan potensi paparan yang masih relevan secara toksikologis bagi populasi rentan.

Risiko yang terkait dengan paparan timbal tetap kritis, terutama untuk populasi yang rentan seperti anak-anak. Pusat Pengendalian dan Pencegahan Penyakit (CDC) merekomendasikan bahwa kadar timbal dalam darah (BLL) pada anak-anak

idealnya turun di bawah 5 µg/dL (Kadar yang melebihi ambang batas ini berkorelasi dengan gangguan neurologis yang parah pada anak-anak, yang selanjutnya memperparah implikasi kesehatan masyarakat. Faktanya, kadar di atas 10 µg/dL dikaitkan dengan defisit kognitif, gangguan perkembangan saraf, dan berbagai masalah kesehatan jangka Panjang.

Aktivitas industri dan emisi kendaraan merupakan kontributor substansial terhadap peningkatan konsentrasi logam berat dan penggunaan bensin bertimbal secara historis terus memengaruhi kadar timbal lingkungan, terutama dari kendaraan lama. Efek kumulatif dari paparan jangka panjang terhadap logam-logam ini dapat menyebabkan dampak kesehatan yang tidak dapat dipulihkan, termasuk gangguan ginjal, penurunan kognitif, dan kerusakan sistem saraf pusat (Peters et al., 2021). Anak jalanan terkena dampak secara tidak proporsional karena kerentanan biologis mereka terhadap polutan lingkungan dan seringnya terpapar udara dan tanah yang terkontaminasi, seperti yang diamati di kota-kota besar termasuk Makassar (Heo & Lee, 2013). Paparan lebih dari batas aman untuk kadmium dan timbal dapat memperparah risiko gangguan pertumbuhan, gangguan perkembangan kognitif, dan peningkatan kerentanan terhadap penyakit kronis dalam jangka Panjang. Pemantauan rutin kadar logam berat seperti kadmium dan timbal di udara dan darah populasi yang berisiko sangat penting. Pemantauan ini memungkinkan deteksi dini risiko kesehatan dan dapat membantu mengevaluasi efektivitas tindakan pengendalian polusi. Selain itu, strategi pengelolaan lingkungan yang efektif diperlukan untuk mengurangi pelepasan kontaminan ini, terutama di lingkungan perkotaan dan industri di mana risiko paparan tetap tinggi. Berdasarkan beberapa rujukan yang telah didapatkan, maka peneliti melakukan Riset dengan topik analisis risiko kesehatan dan gangguan pertumbuhan pada anak jalanan di daerah padat transportasi di Kota Makassar.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan Latar belakang yang telah dikemukakan, dapat dirumuskan beberapa permasalahan:

1. Bagaimana tingkat risiko kesehatan pada anak jalanan akibat eksposur kadmium dan timbal dengan menggunakan perhitungan (RQ) di Kota Makassar.
2. Bagaimana pengaruh paparan logam berat kadmium (Cd) dan timbal (Pb) terhadap pertumbuhan pada anak jalanan di daerah padat transportasi Kota Makassar.
3. Bagaimana Probabilitas dan sensitivitas risiko akibat eksposur kadmium dan timbal pada anak jalanan dengan aplikasi MCS (Monte carlo simulation)

1.3 Tujuan Penelitian

1.3.1 Tujuan Umum

Menganalisis risiko kesehatan dan gangguan pertumbuhan pada anak jalanan akibat pajanan kadmium dan timbal di daerah padat transportasi Kota Makassar .

1.3.2 Tujuan Khusus

1. Menganalisis tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik pada anak jalanan akibat ekspose kadmium dan Timbal dengan menggunakan perhitungan (RQ) di Kota Makassar
2. Menganalisis insulin like growth factor 1 (igf-1) pada anak jalanan akibat paparan kadmium dan timbal menggunakan biomonitoring darah di daerah padat transportasi Kota Makassar
3. Menganalisis Probabiliti dan sensitivitas resiko akibat paparan kadmium dan timbal pada anak jalanan dengan aplikasi MCS (Monte carlo simulation) di daerah padat transportasi kota Makassar

1.4 Manfaat Penelitian

1.4.1. Manfaat Ilmiah

1. Penelitian ini dapat memberikan kontribusi pada pengetahuan ilmiah mengenai dampak kesehatan anak akibat paparan kadmium dan timbal di daerah padat transportasi.
2. Menambah pemahaman tentang hubungan antara konsentrasi kadmium dan timbal di udara ambient dengan kadar darah anak khususnya di daerah padat transportasi.
3. Penelitian ini dapat memperkaya teori toksikologi dengan menjelaskan dampak dan interaksi antara kadmium dan timbal pada pertumbuhan anak khususnya di daerah padat transportasi.
4. Memahami bagaimana paparan kadmium dan timbal di udara dapat mempengaruhi hormon IGF-1, yang dapat berkaitan dengan pertumbuhan khususnya di daerah padat transportasi.
5. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan yang mendalam mengenai dampak jangka panjang paparan kadmium dan timbal pada anak jalan di Kota Makassar.

1.4.2 Manfaat Institusi

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu sumber informasi bagi instansi terkait yang dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan dalam pembuatan kebijakan bagi penyelenggara program dalam pengendalian dampak akibat pencemaran lingkungan di sekitar wilayah pertambangan.

1.4.3. Manfaat Praktis

Penelitian ini diharapkan juga memberikan manfaat bagi masyarakat sebagai berikut:

1. Memberikan informasi bagi pihak berwenang untuk mengelola kualitas udara di daerah padat transportasi guna mengurangi paparan kadmium dan timbal.
2. Menyediakan dasar untuk perancangan program pencegahan dan intervensi kesehatan masyarakat yang dapat mengurangi risiko gangguan pertumbuhan pada anak di daerah padat transportasi.
3. Memberikan informasi bagi pihak kesehatan tentang potensi hubungan antara kadar kadmium dan timbal dalam darah dengan hormon IGF-1, sehingga dapat dilakukan pencegahan dan penanganan yang lebih efektif.

4. Kontribusi pada upaya meningkatkan kualitas hidup anak-anak di daerah padat transportasi dengan memahami dan mengurangi risiko gangguan pertumbuhan akibat paparan kadmium dan timbal

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

1.5.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Kota Makassar, Provinsi Sulawesi Selatan, yang merupakan kota metropolitan dengan tingkat kepadatan lalu lintas tinggi. Lokasi penelitian difokuskan pada enam titik daerah padat transportasi, yang ditentukan berdasarkan data sekunder dari satuan lalu lintas poltabes Makassar dimana yang menentukan tingkat kepadatan transportasi. Keenam titik tersebut meliputi: Sudiang (Kec. Biringkanaya), Daya (Kec. Biringkanaya), Antang (Kec. Manggala), Panaikang (Kec. Panakkukang), Sudirman (Kec. Ujung Pandang), Cendrawasih (Kec. Mamajang). Lokasi-lokasi ini dipilih karena mewakili wilayah dengan aktivitas transportasi tinggi yang berpotensi menghasilkan emisi logam berat (kadmium dan timbal) ke udara ambien.

1.5.2. Objek Penelitian

Objek dalam penelitian ini adalah anak jalanan berusia 3–12 tahun yang tinggal dan beraktivitas di sekitar enam lokasi padat transportasi tersebut. Kelompok ini dipilih karena memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap paparan polusi udara dan logam berat akibat aktivitas luar ruang yang panjang setiap hari. Selain sampel biologis (darah anak), objek lain yang dianalisis adalah udara ambien di sekitar lokasi pengambilan sampel untuk menentukan kadar kadmium (Cd) dan timbal (Pb) di lingkungan.

1.5.3 Variabel Penelitian

Penelitian ini terdiri atas beberapa kelompok variabel utama:

- Variabel Lingkungan: Konsentrasi logam berat kadmium (Cd) dan timbal (Pb) di udara ambien ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Variabel Biomedik: Kadar Cd dan Pb dalam darah anak ($\mu\text{g}/\text{L}$) serta kadar hormon *Insulin-Like Growth Factor-1 (IGF-1)* (ng/mL) sebagai biomarker pertumbuhan.
- Variabel Risiko Kesehatan: Nilai *Hazard Quotient (HQ)* dan *Simulation Monte Carlo*

1.5.4. Metode Analisis

Penelitian ini menggunakan desain analitik dengan pendekatan potong lintang (cross-sectional study), yang dilakukan pada periode April 2024 – Januari 2025. Tahapan analisis meliputi: analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL) berdasarkan pedoman US-EPA (2021), mencakup empat tahap: *hazard identification* (identifikasi bahaya), *exposure assessment* (analisis pajanan), *dose-response assessment* (Analisis Dosis-Respon), *risk characterization* (karakterisasi risiko). Analisis Biomedik: Pemeriksaan kadar Cd dan Pb darah menggunakan metode ICP-MS (*inductively coupled plasma – mass spectrometry*) serta pengukuran kadar IGF-1 dengan metode ELISA (*enzyme-linked immunosorbent assay*). Analisis Statistik: Uji korelasi Pearson dan regresi linier untuk menilai hubungan antara kadar logam berat

dengan kadar IGF-1 dan Simulasi Monte Carlo: Digunakan untuk memperkirakan distribusi probabilistik nilai HQ dan menentukan parameter paling sensitif terhadap risiko.

1.5.5 Batasan Penelitian

1. Penelitian hanya menilai risiko non-karsinogenik akibat paparan kadmium (Cd) dan timbal (Pb) melalui udara ambien.
2. Paparan logam berat melalui jalur makanan, air minum, atau tanah tidak termasuk dalam analisis.
3. Penelitian dilakukan pada anak jalanan usia 3–12 tahun di enam titik pengamatan yang mewakili daerah padat transportasi Kota Makassar.
4. Penelitian ini tidak menilai efek klinis jangka panjang atau efek karsinogenik, serta tidak mencakup intervensi medis langsung.
5. Hasil penelitian menggambarkan kondisi pada saat pengambilan data (cross-sectional), sehingga tidak dapat digunakan untuk menilai hubungan sebab-akibat secara longitudinal.

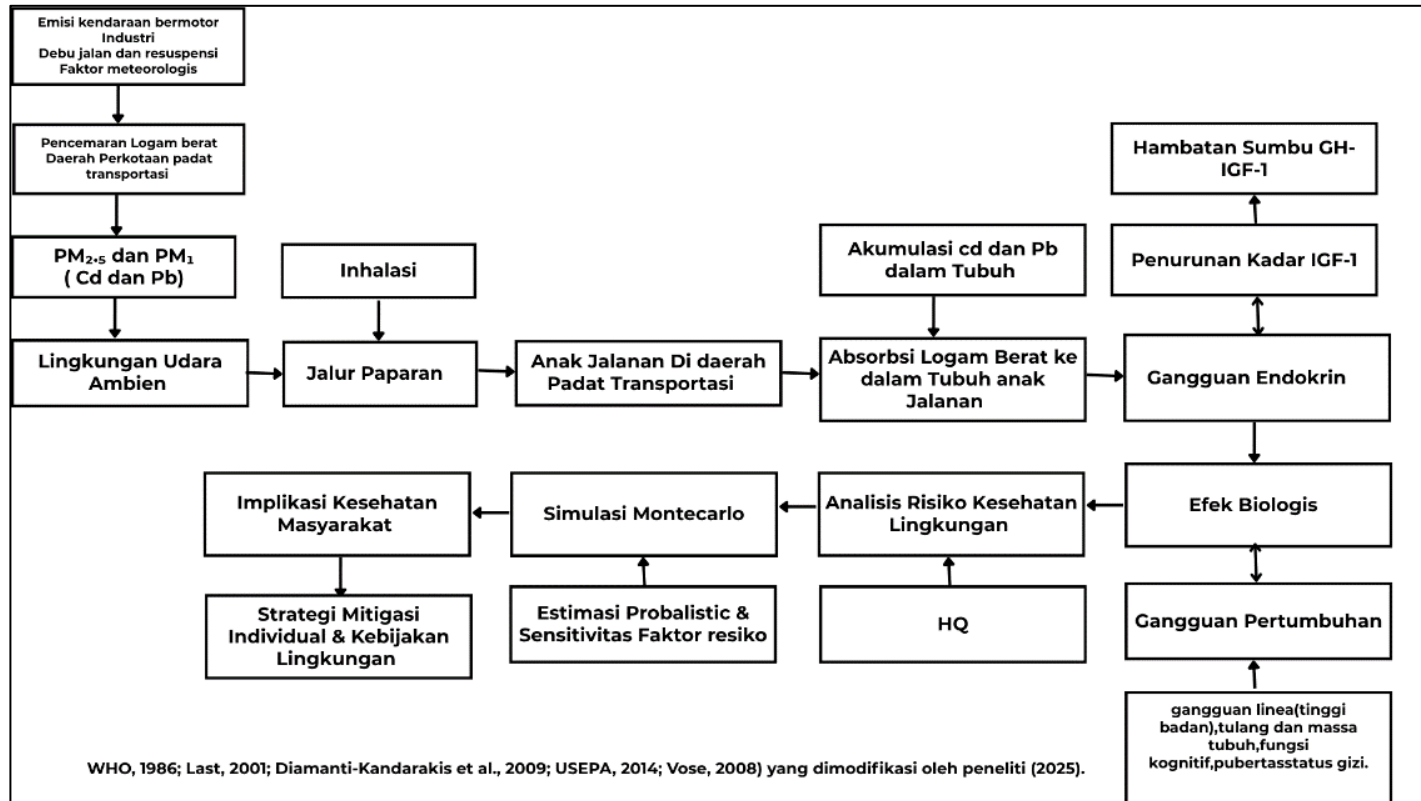
1.6 Kebaruan Penelitian/ Novelty

Membangun **model kausal** yang menghubungkan beban paparan lingkungan, mediator biologis endokrin (IGF-1), dan estimasi risiko populasi probabilistik pada anak jalanan, sehingga menghasilkan pendekatan penilaian risiko yang lebih komprehensif dan berbasis mekanisme.

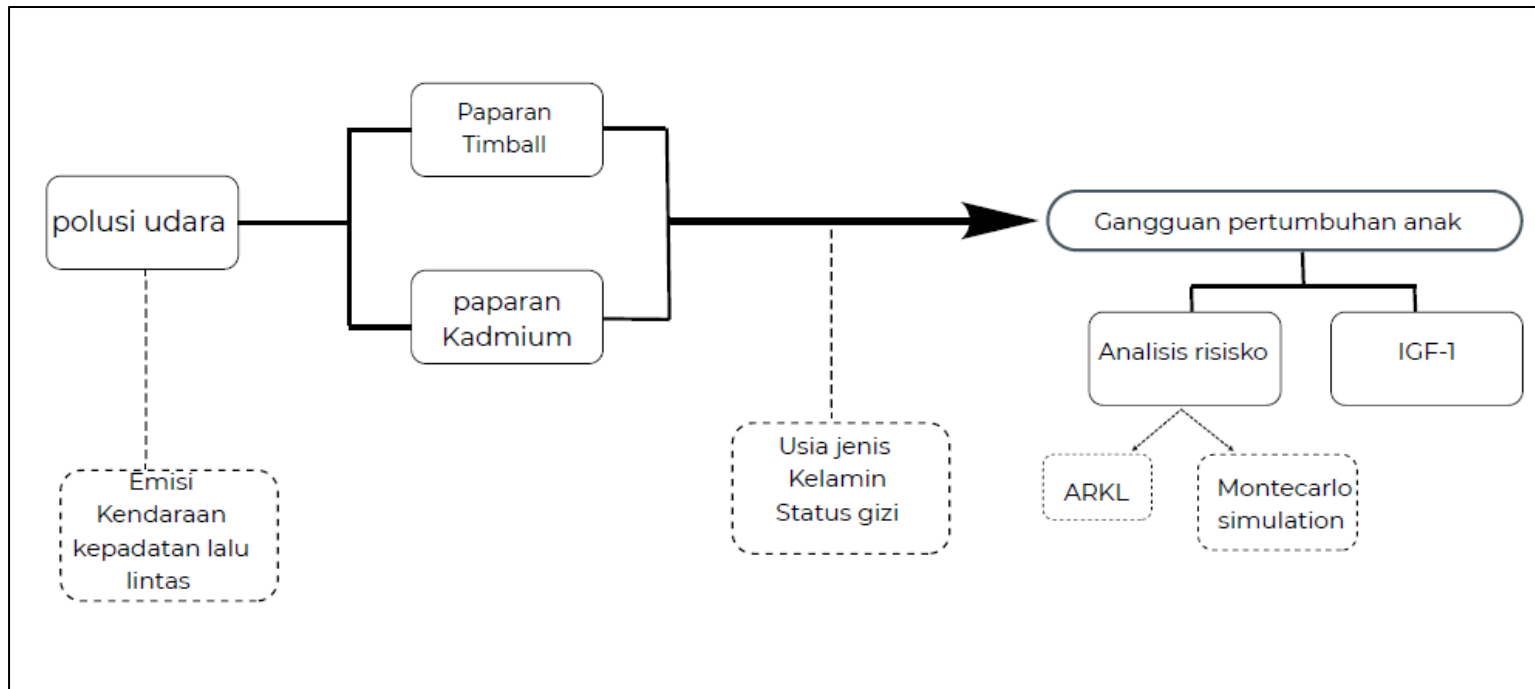
1.7 Kerangka Teori

Kerangka teori ini dimodifikasi dengan mengintegrasikan teori dan model dalam satu pendekatan komprehensif yang menghubungkan faktor lingkungan (paparan Cd dan Pb di udara) dengan faktor biomedik (kadar logam dalam darah dan kadar IGF-1) serta risiko kesehatan non-karsinogenik (HQ dan MCS) pada anak jalanan di daerah padat transportasi Kota Makassar. (*WHO, 1986; Last, 2001; Diamanti-Kandarakis et al., 2009; USEPA, 2014; Vose, 2008*) yang dimodifikasi oleh peneliti (2025).

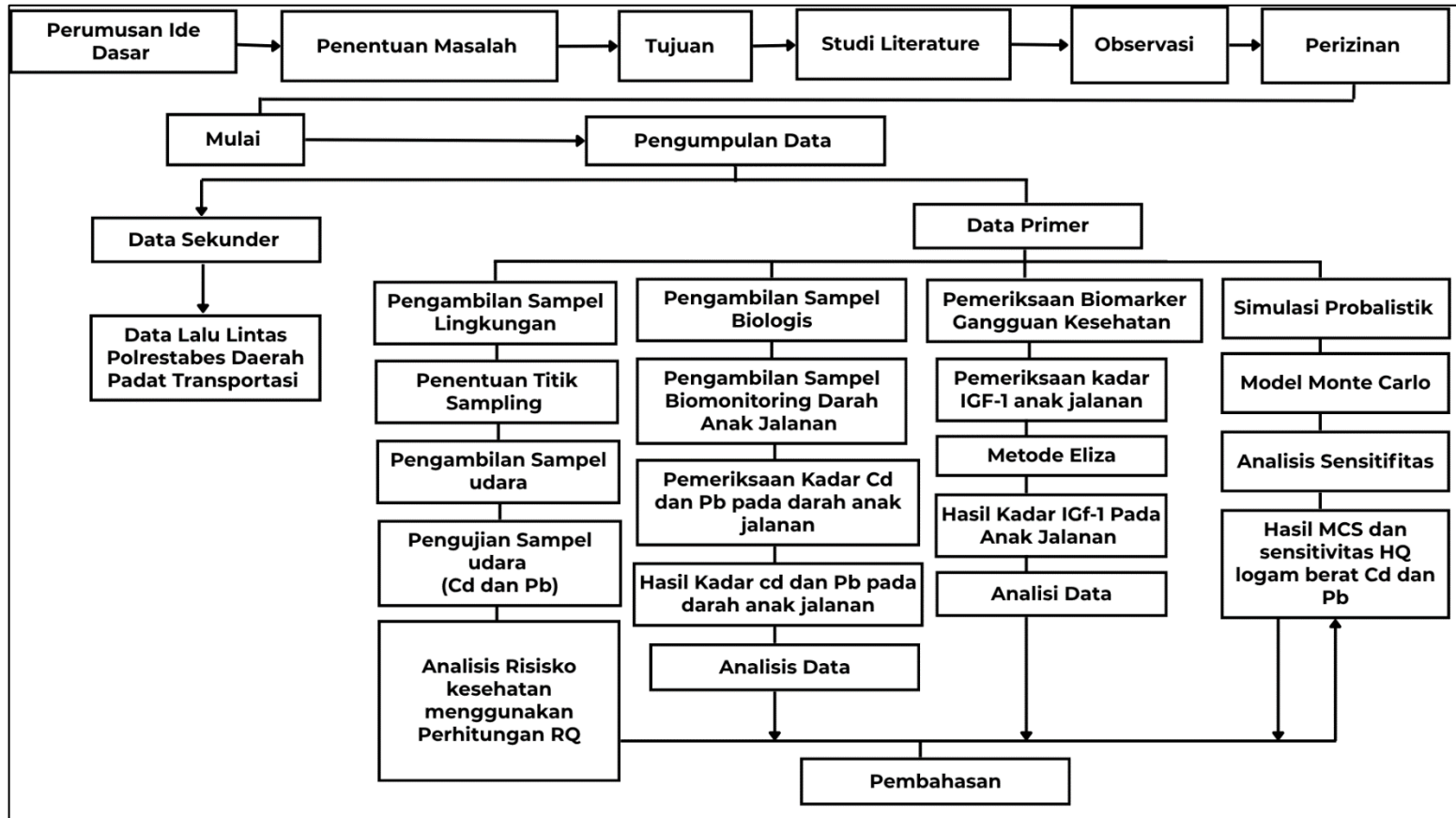
Kerangka Teori Penelitian



Kerangka Konsep Penelitian



Alur Penelitian



BAB II TOPIK PENELITIAN I

ANALISIS TINGKAT RISIKO KESEHATAN PADA ANAK JALANAN AKIBAT PAPARAN KADMIUM DAN TIMBAL DENGAN MENGGUNAKAN PERHITUNGAN HAZARD QUOTIENT (HQ) DI KOTA MAKASSAR

2.1 Abstrak

Pendahuluan: Udara ambien merupakan faktor penting dalam menjaga kesehatan masyarakat, kawasan perkotaan dengan kepadatan transportasi tinggi sering mengalami pencemaran logam berat yang menimbulkan risiko kesehatan serius, khususnya pada anak jalanan yang memiliki durasi aktivitas luar ruangan panjang serta keterbatasan kondisi sosial-ekonomi. Logam berat seperti timbal (Pb) dan kadmium (Cd) bersifat toksik, persisten, dan bioakumulatif, sehingga berpotensi mengganggu fungsi neurologis, endokrin, dan pertumbuhan anak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsentrasi Cd dan Pb di udara ambien serta mengevaluasi tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik pada anak jalanan di Kota Makassar. Metode: Penelitian ini menggunakan desain potong lintang (*cross-sectional*) dengan pendekatan analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL). Pengambilan sampel udara ambien dilakukan di enam lokasi padat transportasi menggunakan *high volume air sampler* dan dianalisis dengan metode *atomic absorption spectrophotometry* (AAS). Perhitungan nilai asupan (*intake*) dan *hazard quotient* (HQ) mengacu pada pedoman *united states environmental protection agency* (USEPA). Hasil: Konsentrasi Cd di udara ambien berkisar antara 0,0009–0,0092 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan konsentrasi Pb lebih tinggi dengan nilai maksimum mencapai 0,337 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Analisis asupan menunjukkan bahwa paparan harian Pb telah melebihi ambang batas aman, sementara paparan Cd masih berada dalam batas aman pada jangka pendek; namun proyeksi pajanan jangka panjang menunjukkan peningkatan nilai HQ Cd hingga >1 setelah 15 tahun pajanan berkelanjutan yang mengindikasikan risiko kronis terhadap Kesehatan (ginjal dan sistem endokrin). Pb menunjukkan nilai HQ yang sangat tinggi baik pada pajanan jangka pendek (rata-rata $7,25 \times 10^1$; maksimum $4,27 \times 10^2$) maupun pajanan jangka panjang ($>2,17 \times 10^3$). Kesimpulan: Timbal (Pb) merupakan polutan utama yang menimbulkan risiko kesehatan akut dan kronis sejak awal paparan, sedangkan kadmium (Cd) berpotensi menimbulkan risiko kumulatif jangka panjang, sehingga diperlukan pengendalian emisi transportasi serta intervensi kesehatan masyarakat yang berfokus pada perlindungan anak jalanan sebagai kelompok dengan kerentanan ganda.

Kata kunci: Anak jalanan; cadmium (Cd); timbal (Pb); *hazard quotient* (HQ); risiko kesehatan lingkungan.

2.2 Pendahuluan

Anak jalanan merupakan kelompok rentan yang sering terpapar berbagai polutan berbahaya, termasuk logam berat seperti kadmium dan timbal. Kedua logam ini berasal dari berbagai sumber pencemaran lingkungan, seperti emisi kendaraan bermotor, limbah industri, dan pembakaran sampah, yang umumnya tersebar di daerah perkotaan seperti Kota Makassar (Armijos et al., 2021). Anak jalanan banyak beraktivitas di area terbuka dengan tingkat polusi tinggi, risiko kesehatan akibat paparan logam berat ini menjadi perhatian serius., kadmium dan timbal diketahui

memiliki dampak negatif terhadap kesehatan manusia. Paparan timbal dalam jangka panjang dapat mengganggu sistem saraf, menyebabkan gangguan kognitif, serta mempengaruhi perkembangan anak (Callan et al., 2014)(Pollack et al., 2014). Pada anak-anak, paparan timbal sangat berbahaya karena dapat menurunkan IQ, menyebabkan kesulitan belajar, dan mengakibatkan gangguan perilaku (Shi et al., 2023). Sementara itu, kadmium berpotensi merusak ginjal, paru-paru, serta berkontribusi terhadap gangguan tulang (Mohammadian-Hafshejani et al., 2024) (Chen et al., 2022)

Toksikokinetika kedua logam ini menunjukkan bahwa setelah masuk ke dalam tubuh, mereka dapat diserap melalui inhalasi, ingesti, dan kontak dermal, kadmium terakumulasi di ginjal dan hati dengan waktu paruh biologis 10–30 tahun, sedangkan timbal memiliki afinitas tinggi terhadap tulang dan dapat menggantikan kalsium dalam tubuh, menyebabkan akumulasi jangka panjang yang sulit dieliminasi (K. Kim et al., 2021). Kedua logam ini dapat melewati sawar darah otak dan plasenta, yang meningkatkan risiko gangguan perkembangan pada anak-anak (Leonel et al., 2023). Dari aspek toksikodinamika, paparan timbal dalam jangka panjang dapat menyebabkan gangguan sistem saraf pusat, menurunkan kecerdasan, menyebabkan gangguan perilaku, serta menghambat pertumbuhan (Adams et al., 2014) (Lu et al., 2019), timbal dapat mengganggu sistem enzimatis dalam tubuh, terutama yang berhubungan dengan sintesis hemoglobin, yang berpotensi menyebabkan anemia dan kelelahan (Fu & Xi, 2020a) dan penurunan daya tahan tubuh (Donangelo et al., 2021) (Mohammadian-Hafshejani et al., 2024)

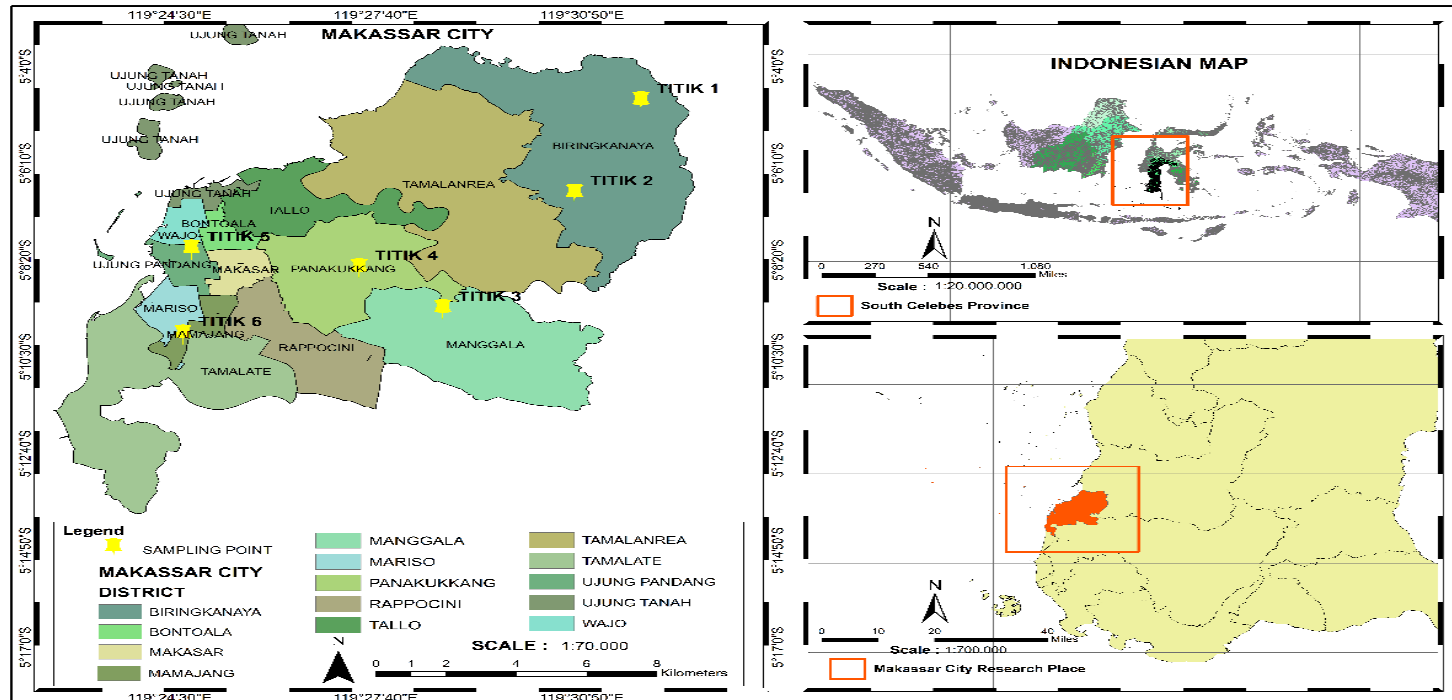
Anak jalanan rentan terhadap dampak kesehatan akibat paparan logam berat (Kao et al., 2024), meliputi, gangguan kognitif, kesulitan belajar, dan penurunan IQ (Aguilera et al., 2023) gangguan perilaku akibat stress, penghambatan pertumbuhan, Osteoporosis dan kerusakan tulang (He et al., 2021), peningkatan risiko gagal ginjal (Chwalba et al., 2023a) serta peningkatan risiko kanker pada anak-anak yang terpapar sejak dini (Zeng et al., 2019)

Metode *risk quotient* (RQ) digunakan sebagai alat analisis perhitungan RQ yang memungkinkan evaluasi terhadap tingkat risiko non-karsinogenik berdasarkan paparan harian yang diterima oleh anak jalanan (Mansyur et al., 2024), kota Makassar memiliki tingkat polusi udara yang cukup tinggi akibat aktivitas industri, transportasi, dan urbanisasi yang pesat (Mallongi et al., 2017), anak jalanan yang hidup di lingkungan dengan kualitas udara yang tercemar berisiko tinggi mengalami dampak kesehatan akibat paparan logam berat ini, oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik pada anak jalanan di Kota Makassar akibat eksposur kadmium dan timbal, dengan menggunakan metode perhitungan RQ. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran ilmiah mengenai tingkat paparan yang dialami oleh anak jalanan, serta menjadi dasar bagi pemerintah dalam merancang strategi mitigasi untuk melindungi kelompok rentan ini.

2.3 Metode

2.3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan April 2024 hingga Desember 2024 dan Lokasi Penelitian dilaksanakan di Kota Makassar, Pengambilan sampel udara ambien dilakukan di kawasan perkotaan, dimana merupakan wilayah yang mempunyai kegiatan utama distribusi pelayanan jasa pemerintahan, pelayanan sosial, dan kegiatan ekonomi. Lokasi penelitian dilakukan di enam Lokasi titik daerah pada transportasi yang diambil dari data sekunder satuan lalu lintas poltabes Makassar.



Gambar 2 1. Lokasi Pengambilan sampel udara daerah padat transportasi dan sampel darah pada anak jalanan di daerah padat transportasi kota Makassar

Keterangan Lokasi Pengambilan Sampel udara Ambien

1. Titik 1 : Sudiang (Kecamatan Biringkanaya)
2. Titik 2 : Daya (Kecamatan Biringkanaya)
3. Titik 3 : Antang (Kecamatan Manggala)
4. Titik 4 : Panaikang (Kecamatan Panakkukang)
5. Titik 5 : Sudirman (Kecamatan Ujung Pandang)
6. Titik 6 : Cendrawasih (Kecamatan Mamajang)

2.3.2. Desain/Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian *cross sectional* dan dianalisis menggunakan metode analisis risiko Kesehatan lingkungan (ARKL), dimana peneliti melakukan observasi dan pengukuran variable pada waktu bersamaan. Metode ARKL merupakan metode dimana faktor-faktor risiko diukur pada waktu yang sama untuk memperoleh prediksi besarnya risiko Kesehatan akibat paparan logam berat kadmium dan timbal pada anak jalanan di daerah padat transportasi kota Makassar, Kelebihan dari analisis Kesehatan lingkungan adalah dapat memprediksikan risiko menurut proyeksi pemaparan kedepan, dengan demikian risiko gangguan Kesehatan yang akan terjadi pada masa yang akan datang akibat *risk agent* yang ada pada lingkungan dapat dicegah. Penelitian analisis risiko dilakukan melalui empat tahapan kajian, yakni identifikasi bahaya (*hazard identification*), analisis pajanan (*exposure assessment*), analisis dosis respon (*dose response assessment*), dan karakteristik risiko (*risk characterization*).

Penilaian risiko kesehatan dilakukan terhadap paparan inhalasi kadmium dan timbal berdasarkan metode *hazard quotient* (HQ), sesuai pedoman dari *environmental protection agency*(US EPA, 2021). Nilai HQ dihitung menggunakan persamaan 1:

$$HQ = \frac{EC}{RfC} \quad (1)$$

di mana EC (*exposure concentration*) merupakan konsentrasi paparan tahunan yang dihitung dari data laboratorium dan karakteristik paparan individu, dan RfC (*reference concentration*) merupakan nilai referensi dari US EPA untuk Cd dan Pb. Nilai EC dihitung menggunakan persamaan 2:

$$EC = \frac{CA \times ET \times EF \times ED}{AT} \quad (2)$$

dengan keterangan:

- CA : konsentrasi logam di udara ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- ET : waktu paparan (jam/hari)
- EF : frekuensi paparan (hari/tahun)
- ED : durasi paparan (tahun)
- AT : waktu rata-rata (jam)

Nilai RfC untuk Cd dan Pb diambil dari referensi toksikologi resmi US EPA. HQ dinyatakan berisiko jika nilainya > 1 . Dalam penelitian ini, seluruh perhitungan HQ dilakukan secara deterministik, di mana semua parameter diasumsikan bernilai tetap tanpa mempertimbangkan variasi atau ketidakpastian secara probabilistik.

2.3.3. Populasi dan Sampel Penelitian

2.3.3.1. Populasi penelitian

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh anak jalanan yang berada di enam titik pengambilan sampel udara ambien pada daerah padat transportasi Kota Makassar.

2.3.3.2. Sampel Penelitian

2.3.3.2.1. Sampel Lingkungan

Sampel Lingkungan yakni sampel udara daerah Padat Transportasi yang meliputi jalan utama dengan Lalu lintas padat dengan jarak antara alat dan Sumber emisi 20 Meter. Dimana penentuan titik Lokasinya ditentukan dari data sekunder yang diperoleh dari satuan lalu lintas polrestabes kota Makassar

2.3.3.2.2. Sampel Manusia

Sampel subjek adalah anak jalanan yang beraktivitas di kawasan padat transportasi dengan kriteria inklusi: berusia di bawah 18 tahun dan secara rutin berada di jalan untuk bekerja, beraktivitas, atau tinggal selama minimal lima tahun terakhir. Anak dengan gangguan perkembangan mental dan anak yang tidak bersedia berpartisipasi dikecualikan dari penelitian ini.

2.3.4. Instrumen Penelitian

2.3.4.1. Sampel Lingkungan (Udara ambien)

Penentuan lokasi pengambilan contoh uji : Prinsip Dalam penentuan lokasi pengambilan contoh uji, yang perlu diperhatikan adalah bahwa data yang diperoleh harus dapat mewakili daerah yang sedang dipantau, yang telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Data penentuan Lokasi pengambilan sampel uji di dapatkan dari data sekunder yang diperoleh dari satuan lalu lintas polrestabes kota Makassar.

2.3.4.2. Lokasi pengambilan contoh uji

Titik pemantauan kualitas udara ambien ditetapkan dengan mempertimbangkan factor-faktor yaitu meteorologi (arah dan kecepatan angin),faktor geografi seperti topografi, dan tata guna lahan, Area dengan konsentrasi pencemar tinggi. Dimana dalam penelitian ini daerah yang dilakukan pengambilan contoh uji adalah Area dengan kepadatan transportasi di kota Makassar.

2.3.4.3. Persyaratan pemilihan lokasi pengambilan contoh uji

Beberapa petunjuk yang dapat digunakan dalam pemilihan titik pengambilan contoh uji adalah: Hindari tempat yang dapat merubah konsentrasi akibat adanya absorpsi, atau adsorpsi (seperti dekat dengan gedung-gedung atau pohon-pohonan). Hindari tempat dimana pengganggu fisika dapat menghasilkan suatu hasil yang mengganggu pada saat mengukur debu (partikulat matter) tidak boleh dekat dengan *incinerator* baik domestik maupun komersial, gangguan listrik terhadap peralatan pengambil contoh uji dari jaringan listrik tegangan tinggi, Letakkan peralatan di daerah dengan gedung/bangunan yang rendah dan saling berjauhan.

2.3.5. Pemantauan kualitas udara ambien

Kadar kadmium dan Timbal di udara diukur menggunakan alat dan dianalisis dengan metode *atomic absorption spectrophotometer* (AAS). Sampel udara (debu) diambil selama 24 jam

2.3.5.1. Cara uji Logam Berat Timbal dan Cadmium

2.3.5.1.1. Prinsip

Partikel di udara ambien ditangkap dengan menggunakan alat HVAS dan media penyaring atau filter. Timbal yang terkandung di dalam partikel tersuspensi tersebut didestruksi dengan menggunakan pelarut asam, kemudian diukur dengan alat Spektrofotometer Serapan Atom(SSA) nyata.

2.3.5.1.2. Bahan

Asam nitrat pekat, asam klorida pekat, larutan asam nitrat (HNO_3), larutan asam klorida (HCl), gas asetilen, air bebas mineral, hidrogen peroksida (H_2O_2) pekat, dan larutan induk kadmium dan timbal $1.000 \mu\text{g/mL}$.

2.3.5.1.3. Peralatan

Spektrofotometer Serapan Atom (SSA), Pemanas listrik yang dilengkapi dengan pengatur suhu, labu ukur 50 mL, 100 mL, dan 1.000 mL , gelas piala 200 mL atau 250 mL; dan 1.000 mL , gelas ukur 100 mL dan 1.000 mL , pipet volumetric, kaca arloji, kertas saring berpori $80 \mu\text{m}$ diameter 125 mm atau 110 mm, alat pemotong yang terbuat dari keramik; dan corong gelas

2.3.5.1.4. Persiapan pengujian

2.3.5.1.4.1. Pembuatan larutan standar Kadmium dan timbal (Pb) $100 \mu\text{g/mL}$

Pipet 10 mL larutan induk timbal $1.000 \mu\text{g/mL}$ dan masukkan ke dalam labu ukur 100 mL; tambahkan air bebas mineral sampai tepat pada tanda tera, lalu homogenkan.

2.3.5.1.4.2. Pembuatan kurva kalibrasi

Buat deret larutan kerja dalam labu ukur 50 mL dengan 1 (satu) blanko dan minimal 3 (tiga) kadar yang berbeda secara proporsional dan berada pada rentang pengukuran, dimana standar larutan kerja terendah merupakan limit deteksi metode, atur alat spektrofotometer serapan atom (SSA) nyala dan optimalkan sesuai dengan petunjuk penggunaan alat untuk pengujian kadar Pb, aspirasikan larutan deret standar satu persatu ke dalam alat SSA nyala melalui pipa aspirator, kemudian baca dan catat masing-masing serapannya;

2.3.5.1.4.3. Pembuat kurva kalibrasi antara serapan dan konsentrasi Logam Berat (Cd dan Pb)

Pengujian contoh uji : Menyiapkan kertas filter yang berasal dari pengujian partikel tersuspensi total (TSP) sesuai dengan SNI 7119-3, diukur dan catat panjang dan lebar filter yang terpapar debu (mm) hitung luasnya (mm^2), memotong kertas filter menjadi 4 bagian yang sama kemudian dihitung dan catat luas (mm^2), mengambil satu bagian potongan filter tersebut sebagai contoh uji dan memasukkan ke dalam gelas piala 200 mL atau 250 mL (diberi kode "A") ditambahkan 60 mL larutan HCl dan 5 mL H_2O_2 pekat dan menutup mulut gelas piala "A" dengan kaca arloji, meletakkan gelas piala "A" di atas pemanas listrik, memanaskan contoh uji selama kurang lebih satu jam pada suhu 105°C , menurunkan contoh uji dari pemanas dan membiarkan hingga mencapai suhu kamar, menambahkan kembali 5 mL H_2O_2 pekat dan melakukan pemanasan gelas piala bertutup kaca arloji di atas pemanas listrik selama 30 menit, mendinginkan contoh uji dan kemudian membilas kaca arloji dengan air bebas mineral, saring contoh uji dengan kertas saring, residu kertas saring tetap terdapat dalam gelas piala "A" dan tampung filtrat pada gelas piala 200 mL atau 250 mL (diberi kode "B"); tambahkan kembali 50 mL larutan HCl ke dalam gelas piala "A", tutup dengan kaca arloji dan lakukan pemanasan selama 30 menit, dinginkan contoh uji dan kemudian lakukan penyaringan Kembali satukan filtrat dalam gelas piala "B"; panaskan filtrat dalam gelas piala "B" sampai mendekeati kering (sisa cairan tinggal sedikit) yang ditandai dengan terbentuknya kristal atau

garam pada dinding gelas piala “B”; tambahkan 10 mL HNO₃ ke dalam gelas piala “B” lanjutkan pemanasan selama beberapa menit (sampai seluruh residu terlarut), dinginkan dan saring contoh uji, tampung filtrat dalam labu ukur 50 mL, bilas gelas piala “B” dengan HNO₃ kemudian hasil bilasan masukkan kembali ke dalam labu ukur 50 mL, tepatkan isi labu ukur sampai tanda tera dengan HNO₃ dan homogenkan, contoh uji siap dianalisis dengan SSA

2.3.5.1.4.4. Perhitungan

Perhitungan kadar timbal dan Cadmium dalam contoh uji dilakukan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$C_{Pb} = \frac{(C_t - C_b) \times V_t \times S / S_t}{V}$$

Keterangan:

- CPb adalah kadar timbal di udara (µg/Nm³);
- C t adalah kadar timbal dalam larutan contoh uji (µg/mL);
- C b adalah kadar timbal dalam larutan blanko (µg/mL);
- Vt adalah volume larutan contoh uji (mL);
- S adalah luas contoh uji yang terpapar debu pada permukaan filter (mm²);
- St adalah luas contoh uji yang digunakan (mm²);
- V adalah volume udara yang dihisap dikoreksi pada kondisi normal 25°C, 760 mmHg (Nm³).

CATATAN: Volume udara yang dihisap dihitung berdasarkan perhitungan pada saat pengambilan

2.3.6 Pengumpulan Data

2.3.6.1 Data Primer

Data primer pada penelitian ini diperoleh dari hasil observasi dan pengukuran berupa data konsentrasi kadmium dan timbal pada udara dan pengukuran antropometri serta Perhitungan analisis resiko untuk mengetahui Intake (i) Risk Quotient (RQ)

2.3.6.2 Data Sekunder

Data sekunder diperoleh dari institusi terkait seperti artikel, jurnal, skripsi, tesis, disertasi maupun literatur ilmiah yang berkaitan dengan penelitian ini

2.3.6.3 Prosedur penelitian

Prosedur penelitian ini dilakukan beberapa tahapan yaitu :

1. Pada manusia : Melakukan permintaan kesediaan pada anak jalanan untuk mengikuti penelitian setelah itu dilakukan skrining awal
2. Pada Udara : Melakukan Observasi wilayah sesuai kriteria dan Melakukan Peninjauan Lokasi Bersama Tim Laboratorium, menilai titik Kepadatan transportasi, wilayah industry dan pemukiman warga.

2.3.7 Analisis Data

Pengolahan data dilakukan secara elektronik dengan software pengolahan data diawali dengan Editing yaitu pemeriksaan pada setiap hasil survei dan kuesioner untuk memastikan bahwa tidak ada kesalahan dalam pengisian kuisiomer dilanjutkan

dengan Coding yaitu kegiatan yang mempermudah pada saat analisis data dan juga mempercepat entry data kemudian Tabulasi data dimana kegiatan ini mengelompokkan data kedalam tabel yang telah dibuat agar sesuai dengan maksud dan tujuan. Kemudian Entry, yaitu memasukkan data yang diperoleh melalui kuisioner dalam program yang telah dimasukkan ke dalam komputer untuk memastikan tidak ada kesalahan dalam entry data

2.3.8 Penyajian Data

Data-data yang telah dianalisis berupa hasil pemeriksaan di laboratorium, perhitungan intake dan risk quotient, serta target hazard quotient selanjutnya akan disajikan dalam bentuk tabel dan narasi.

2.4 Hasil dan Pembahasan

2.4.1 Hasil Penelitian

2.4.1.1 Karakteristik Responden

Responden dalam penelitian ini berjumlah 107 responden. Responden merupakan anak jalanan di kota Makassar yang tersebar di enam titik lokasi penelitian, yakni : Sudiang, Daya, Antang, Panaikangm Sudirman, dan Cendrawasi. Adapun distribusi responden dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 2. 1 Distribusi Responden Anak Jalana di Kota Makassar Tahun 2024

Karakteristik	(n)=107 anak Reponden	%	Kadmium				Timbal			
			Intake		HQ		Intake		HQ	
			Batas Tdk Aman		Berisiko		Batas Tidak Aman		Berisiko	
			Real time	Life time (5 tahun)	Real time	Life time (5tahun)	Real time	Life time (5tahun)	Real time	Life time (5tahun)
Jenis Kelamin										
Laki – Laki	75	70.1	0	30	0	6	107	107	107	107
Perempuan	32	29.9	0	26	0	2	107	107	107	107
Kelompok Umur										
1 – 5 Tahun	38	35.5	0	0	0	0	0	0	0	0
6 – 10 Tahun	21	19.6	0	21	0	3	107	107	107	107
11 -15 Tahun	48	44.9	0	35	0	5	107	107	107	107

Sumber: Data Primer 2024

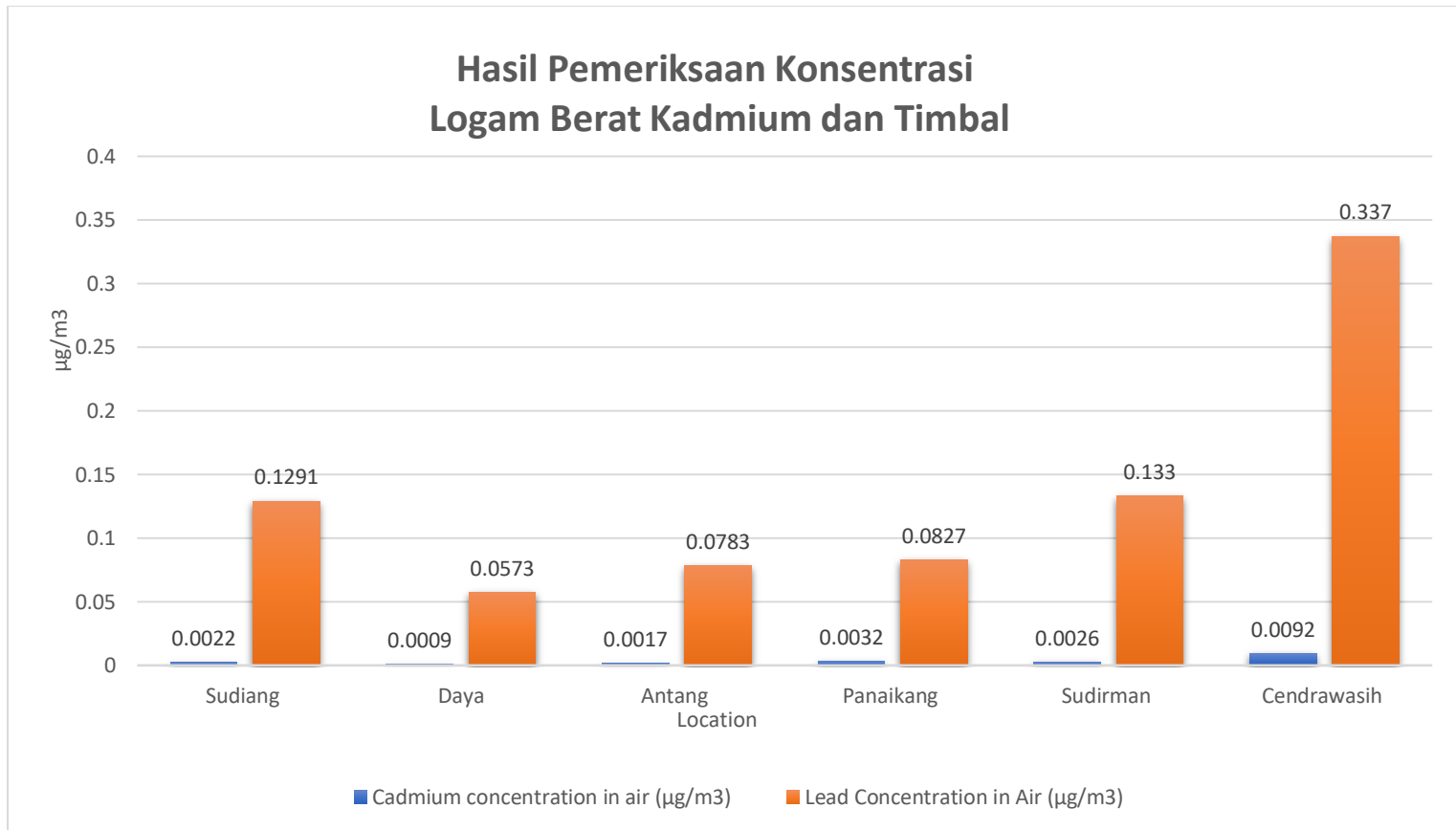
Tabel 2.1 Distribusi responden anak jalanan di Kota Makassar tahun 2024 menunjukkan bahwa sebagian besar responden berjenis kelamin laki-laki (70,1%), sedangkan perempuan hanya sebesar 29,9%. Hal ini menegaskan bahwa anak laki-laki lebih dominan dalam aktivitas jalanan dibandingkan anak perempuan. Berdasarkan kelompok umur, mayoritas responden berada pada rentang usia 11–15 tahun (44,9%), diikuti usia 1–5 tahun (35,5%), dan kelompok usia 6–10 tahun (19,6%). Pola ini menggambarkan bahwa anak usia remaja lebih banyak terlibat di ruang jalanan, meskipun anak usia dini juga cukup signifikan terpapar lingkungan padat transportasi.

Pola aktivitas dalam penelitian ini berkaitan dengan kegiatan para anak jalanan yang menjadi responden dalam penelitian ini. Data terkait pola aktivitas responden Rata-rata berat badan responden adalah 23,2 kg dengan rentang 12–46 kg. Nilai laju inhalasi (R) menunjukkan rerata 0,53 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{hari}$, menandakan adanya variasi intensitas aktivitas luar ruang. Lama pajanan harian berkisar antara 7–12 jam, dengan rerata 9,5 jam per hari, sehingga memperlihatkan tingginya intensitas anak berada di lingkungan padat lalu lintas. Frekuensi pajanan tahunan mencapai rerata 64,8 hari/tahun. Data ini menunjukkan bahwa paparan terhadap udara tercemar bersifat kronis dan berulang, yang berpotensi meningkatkan akumulasi logam berat dalam tubuh.

2.4.1.2 Penilaian Risiko

2.4.1.3.1. Hazard Identification (Identifikasi Bahaya)

Identifikasi bahaya (*hazard identification*) dalam analisis risiko kesehatan lingkungan merupakan proses krusial yang bertujuan untuk mendeteksi dan menganalisis potensi bahaya yang ada di lingkungan sekitar yang dapat memengaruhi kesehatan manusia. Proses ini melibatkan pengenalan berbagai faktor yang berpotensi berbahaya, seperti bahan kimia, mikroorganisme patogen, polutan udara, serta kondisi fisik dan lingkungan yang dapat menimbulkan risiko kesehatan. Adapun jenis agen risiko dalam penelitian ini adalah kandungan logam berat cadmium (Cd) dan timbal (Pb) yang ditemukan pada 6 titik yang menjadi lokasi penelitian yang ditemukan di udara. Adapun hasil pemeriksaan konsentrasi logam berat cadmium dan timbal pada penelitian ini adalah sebagai berikut :



Gambar 2.2 Hasil Pemeriksaan Konsentrasi Logam Berat Cadmium dan Timbal di Daerah Padat Transportasi di Kota Makassar (sumber; Data primer)

Berdasarkan gambar 2.2 Hasil pemeriksaan konsentrasi Cd dan Pb di 6 lokasi padat transportasi menunjukkan variasi antar lokasi. Konsentrasi Cd relatif rendah, berkisar 0,0009–0,0092 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan Pb jauh lebih tinggi, dengan nilai tertinggi di lokasi Cendrawasih (0,337 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Temuan ini menegaskan bahwa timbal merupakan logam dominan pada pencemaran udara akibat aktivitas transportasi di Makassar, sementara cadmium hadir dalam kadar yang lebih rendah namun tetap berpotensi toksik karena sifat akumulatifnya

2.4.1.3.2 Exposure Assessment (Analisis Pemajanan)

Analisis pemajanan, atau *exposure assessment*, dalam konteks analisis risiko kesehatan, adalah proses evaluasi yang bertujuan untuk mengevaluasi kontak individu atau populasi dengan faktor-faktor berbahaya yang ada dalam lingkungan. Proses ini penting untuk menentukan apakah pajanan tersebut dapat menghasilkan efek kesehatan yang merugikan dan untuk mengidentifikasi ukuran dan karakteristik pajanan tersebut. Mengacu pada literatur, analisis pajanan mencakup beberapa elemen penting, termasuk intensitas, durasi, frekuensi, dan cara pajanan terjadi, baik melalui inhalasi, kontak dermal, maupun ingesti (Ihsan et al., 2021).

Dalam Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL), data dan informasi terkait konsentrasi (C), laju inhalasi (R), frekuensi pajanan (fE), durasi pajanan (Dt), waktu pajanan (tE), usia dan berat badan (Wb) diperoleh dengan menggunakan wawancara pada responden. Adapun penilaian analisis pemajanan (*Exposure Assessment*) dilakukan dengan cara memasukkan angka-angka antropometri dan pola aktivitas ke dalam suatu formula (*Microsoft Excel*).

Nilai *Intake* merupakan nilai yang diperoleh dari pajanan dengan cara melakukan analisis karakteristik responden untuk mengetahui setiap agen risiko (*risk agent*) yang diukur dari udara ambien. Nilai intake harian memperlihatkan bahwa rata-rata pajanan cadmium berada pada kisaran 0,00093 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{hari}$, sedangkan timbal mencapai 0,0357 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{hari}$. Nilai maksimum intake timbal (0,211 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{hari}$) jauh lebih tinggi dibandingkan cadmium (0,00795 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{hari}$). Hal ini mengindikasikan bahwa walaupun cadmium relatif kecil dan timbal memberikan beban pajanan yang signifikan bagi anak jalanan, khususnya pada kondisi lalu lintas padat. Rumus Intake yang di gunakan dalam penelitian ini :

$$ADD = \frac{C \times IR \times ABSg \times EF \times ED}{AT \times BW}$$

Keterangan :

ADD (<i>Average Daily Doses</i>)	: Jumlah konsentrasi agen risiko yang masuk ke dalam tubuh manusia dengan berat badan tertentu (kg) setiap harinya (mg/kg/hari)
C (Konsentrasi)	: Konsentrasi agen risiko
IR (<i>Rate</i>)	: Laju konsumsi atau banyaknya volume air yang

	masuk setiap harinya dalam tubuh manusia (mg/l)
ABSg	: Nilai konstanta absorpion agen risiko melalui ingesti (0.001)
EF (Exposure Frequensy)	: Lama atau jumlah hari (hari/tahun) terjadinya pajanan
ED (<i>Duration Time</i>)	: Lamanya atau jumlah tahun terjadinya pajanan. Residual (permukiman) pajanan seumur hidup
Wb (<i>Weight of Body</i>)	: Berat badan manusia/populasi/kelompok
AT (<i>Average Time</i>)	: Periode waktu rata-rata (30 tahun x 365 hari/tahun untuk efek non karsiogenik dan 70 tahun x 365 hari/tahun untuk efek karsiogenik)

Tabel 2.2 Intake cadmium dan timbal pada Anak Jalanan di Daerah Padat Transportasi di Kota Makassar

	Cadmium		Timbal		Keterangan	
	Min- Max (mg/kg/day)	Average (mg/kg/day)	Min-Max	Average	Cd	Pb
<i>Realtime</i>	0.0001-0.0079	0.0009	0.0017-0.2105	0.0357	Batas aman (MS)	Batas Tidak aman(TMS)
<i>Lifetime</i>						
5	0.0006-0.0397	0.0046	0.0085-1.0525	0.1787	Batas aman (MS)	Batas Tidak aman(TMS)
10	0.0012-0.0795	0.0093	0.0171-2.1051	0.3574	Batas aman (MS)	Batas Tidak aman(TMS)
15	0.0018-0.1192	0.0139	0.0256-3.1576	0.5361	Batas Tidak aman (TMS)	Batas Tidak aman(TMS)
20	0.0024-0.1590	0.0186	0.0342-4.2102	0.7148	Batas Tidak aman(TMS)	Batas Tidak aman(TMS)
25	0.0030-0.1987	0.0232	0.0427-5.2627	0.8935	Batas Tidak aman(TMS)	Batas Tidak aman(TMS)
30	0.0036-0.2385	0.0279	0.0513-6.3153	1.0722	Batas Tidak aman(TMS)	Batas Tidak aman(TMS)

Keterangan : * MS (Memenuhi Syarat (paparan harian tersebut masih dalam batas aman dan tidak menimbulkan risiko kesehatan non-karsinogenik yang signifikan.),

* TMS (Tidak Memenuhi Syarat (paparan sudah melampaui ambang batas aman, sehingga berpotensi menimbulkan

risiko kesehatan, terutama pada kelompok rentan seperti a nak-anak.)

- * Nilai intake/ADD mengacu pada nilai RfD masing masing dari agen risiko (Cadmium dan timbal) sehingga dapat ditetapkan apakah memenuhi standart atau tidak memenuhi standart. (Nilai RfD Cadmium ; 0.01mg/kg/day, Timbal; 0.000493mg/kg/day) *Sumber : Environmental Protection Agency (EPA),*

Berdasarkan Tabel 2.2 menunjukkan bahwa agen risiko logam berat cadmium secara realtime dinyatakan masih dalam batasan aman dengan nilai 0.00093 mg/m³/Hari sedangkan untuk agen risiko logam berat timbal secara realtime dinyatakan batasan tidak aman dengan nilai 0.0357 mg/m³/Hari. Untuk intake secara lifetime pajanan risiko logam berat cadmium dinyatakan batasan aman pada tahun ke 5 – 10 dengan nilai 0.00465– 0.093mg/m³/Hari. Sedangkan untuk intake secara lifetime pajanan risiko logam berat timbal dinyatakan tidak aman pada tahun ke 5 – 30 dengan nilai 0.179- 10.7µg/m³/Hari.

2.4.1.3.3 Analisis Dosis Respon

Setelah melakukan identifikasi bahaya (agen risiko, konsentrasi dan media lingkungan), maka tahap selanjutnya adalah melakukan analisis dosis-respons yaitu mencari nilai RfD, dan/atau RfC dari agen risiko yang menjadi fokus ARKL, serta memahami efek apa saja yang mungkin ditimbulkan oleh agen risiko tersebut pada tubuh manusia. Analisis dosis-respon ini tidak harus dengan melakukan penelitian percobaan sendiri namun cukup dengan merujuk pada Literature yang tersedia. Nilai RfC berdasarkan informasi dari U.S. *Environmental Protection Agency* (EPA), nilai RfC untuk kadmium di udara berada pada kisaran 0,0002 mg/m³ dan untuk timbal, nilai RfC yang ditetapkan juga oleh EPA adalah 0,0004 mg/m³ (H. W. Liu et al., 2020).

2.4.1.3.4 Risk Characterization

Karakterisasi risiko adalah upaya yang dilakukan untuk menentukan tingkat risiko atau dengan kata lain menentukan apakah suatu agen risiko pada konsentrasi tertentu yang dianalisis dalam ARKL, kemungkinan besar akan menimbulkan masalah kesehatan pada masyarakat (dengan karakteristik seperti berat badan, laju inhalasi/konsumsi, waktu, frekuensi, durasi pajanan yang tertentu) atau tidak. Karakteristik risiko diperoleh dengan membandingkan/membagi intake dengan dosis /konsentrasi agen risiko tersebut. Variabel yang digunakan untuk menghitung tingkat risiko adalah intake (yang didapatkan dari analisis pajanan) dan dosis referensi (RfD), konsentrasi referensi (RfC) atau slope factor (SF) yang didapat dari literature.

adapun hasil perhitungan karakteristik risiko yang dihitung dalam *Hazard Quotient* (HQ) logam berat kadmium (Cd) dan timbal (Pb) yang masuk ke dalam tubuh responden melalui jalur inhalasi

Analisis *Hazard Quotient* (HQ) realtime pajanan logam berat cadmium (Cd) dan timbal (Pb) pada anak di kawasan padat transportasi Kota Makassar ditampilkan pada Gambar 2.3, Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai HQ cadmium berada pada kisaran yang relatif rendah, dengan nilai minimum sebesar 0,0118 rata-rata 0,093 dan maksimum 0,795. Seluruh nilai tersebut masih berada di bawah ambang batas 1, sehingga paparan kadmium secara umum belum menunjukkan indikasi risiko non-karsinogenik yang berarti bagi anak.

Sebaliknya, nilai HQ timbal menunjukkan hasil yang jauh lebih tinggi dibandingkan cadmium pada semua kategori. Nilai minimum HQ timbal tercatat sebesar 3,47, yang sudah melebihi ambang batas aman. Nilai rata-rata HQ timbal mencapai 72,5. sedangkan nilai maksimum tercatat sangat tinggi, yaitu 427. Kondisi ini menunjukkan bahwa bahkan pada tingkat pajanan terendah sekalipun, paparan

timbal tetap menimbulkan risiko kesehatan non-karsinogenik, dan risikonya meningkat tajam pada kondisi rata-rata maupun maksimum.

Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa timbal merupakan faktor dominan yang memberikan kontribusi terbesar terhadap risiko kesehatan anak di daerah padat transportasi, sementara kadmium relatif tidak menunjukkan potensi risiko non-karsinogenik yang signifikan dalam konteks paparan rata-rata maupun ekstrem.

Proyeksi *Hazard Quotient (HQ) lifetime* menunjukkan bahwa nilai HQ untuk kadmium (Cd) relatif rendah sepanjang periode paparan. Pada 5 tahun paparan, nilai HQ Cd berada di bawah 1, kemudian meningkat secara perlahan hingga mendekati 3 pada 30 tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa risiko non-karsinogenik akibat paparan Cd masih dalam kategori rendah hingga sedang, meskipun sifat akumulatif Cd tetap perlu diwaspadai pada paparan jangka panjang.

Sebaliknya, nilai HQ timbal (Pb) memperlihatkan pola peningkatan yang sangat tajam. Pada 5 tahun paparan, nilai HQ sudah mencapai ratusan, kemudian terus meningkat secara linear hingga melampaui dua ribu pada 30 tahun paparan. Nilai ini jauh di atas ambang batas $HQ = 1$, yang berarti bahwa paparan Pb menimbulkan risiko non-karsinogenik yang signifikan bahkan sejak awal periode paparan.

Perbandingan antara kedua logam menunjukkan bahwa Pb memberikan kontribusi risiko kesehatan yang jauh lebih besar dibanding Cd. Hal ini menegaskan bahwa anak jalanan di daerah padat lalu lintas lebih rentan mengalami dampak kesehatan dari paparan timbal, sehingga diperlukan upaya mitigasi yang lebih serius terhadap sumber emisi Pb di lingkungan perkotaan. Rumus HQ yang di gunakan dalam penelitian ini :

$$HQ = \frac{ADD}{RfD}$$

Keterangan :

HQ : *Hazard Quotient*

RfD : *Reference of Dose*

(Nilai RfD Kadmium ; 0.01mg/kg/day, Timbal; 0.000493mg/kg/day)

ADD : *Average Daily Doses*

Tabel 2.3. Hazard Quotient (HQ) Anak jalanan akibat paparan Cadmium dan Timbal di Daerah Padat Transportasi di Kota Makassar

HQ	Cadmium		Timbal		Keterangan	
	Min- Max	Average	Min - max	Average	Cadmium	Timbal
<i>Realtime</i>	0.01-0.79	0.09	3.46-426	72.49	Tidak Berisiko	Berisiko sedang
<i>Lifetime</i>						
5	0.05-39.7	0.46	17.33-2134	362	Tidak Berisiko	Berisiko Tinggi
10	0.11-7.95	0.93	34.67-4269	724	Tidak Berisiko	Berisiko Tinggi
15	0.17-11.92	1.39	52.01-6404	1087	Berisiko rendah	Berisiko Tinggi
20	0.23-15.9	1.86	69.35-8539	1449	Berisiko rendah	Berisiko Tinggi
25	0.29-19.87	2.32	86.69-10674	1812	Berisiko rendah	Berisiko Tinggi
30	0.35-23.84	2.79	104-12809	2174	Berisiko rendah	Berisiko Tinggi

Keterangan : Berisiko jika $HQ > 1$, tidak berisiko jika $HQ < 1$
 (1-10=berisiko rendah, 100-500=berisiko rendah , <1000=berisiko tinggi)
 Sumber : Environmental Protection Agency (EPA)

Analisis nilai *Hazard Quotient (HQ)* menunjukkan bahwa paparan cadmium (Cd) secara realtime masih berada di bawah ambang batas, dengan rata-rata dan nilai maksimum kurang dari 1 sehingga dikategorikan tidak berisiko. Sebaliknya, paparan timbal (Pb) secara realtime memiliki nilai HQ yang jauh melampaui ambang batas, baik pada nilai rata-rata maupun maksimum, sehingga menunjukkan adanya risiko non-karsinogenik yang signifikan bahkan pada paparan jangka pendek. Pada proyeksi pajanan jangka panjang (lifetime), Cd masih relatif aman hingga 15 tahun, namun mulai menimbulkan risiko setelah 20 tahun paparan dengan nilai HQ yang melebihi 1. Sementara itu, Pb secara konsisten menunjukkan nilai HQ yang sangat tinggi pada semua periode pajanan (5–30 tahun) dengan tren peningkatan linear, menandakan bahwa timbal merupakan faktor dominan yang berkontribusi terhadap risiko kesehatan non-karsinogenik pada anak jalanan di daerah padat lalu lintas.

2.4.2 Pembahasan

Udara merupakan elemen esensial yang menopang kehidupan di bumi karena menyediakan oksigen yang sangat penting bagi proses respirasi. Oksigen berperan dalam metabolisme sel, sehingga kekurangan pasokan udara bersih akan berdampak pada gangguan fungsi fisiologis manusia dan organisme aerobik lainnya. Udara juga berperan dalam menjaga keseimbangan ekosistem, termasuk mengatur iklim, distribusi kelembapan, dan mendukung keberlanjutan pertanian serta keanekaragaman hayati. Dengan demikian, kualitas udara yang baik merupakan prasyarat utama bagi kesehatan manusia maupun ekosistem (Ananda Jayalal et al., 2019).

Industrialisasi, urbanisasi, dan peningkatan aktivitas manusia telah memicu pencemaran udara, terutama oleh logam berat. Logam seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), merkuri (Hg), dan arsenik (As) dapat dilepaskan ke atmosfer melalui pembakaran bahan bakar fosil, emisi kendaraan bermotor, aktivitas industri, serta penggunaan pestisida berbasis logam. Setelah berada di atmosfer, logam-logam ini dapat terdispersi, mengendap ke tanah atau perairan, dan selanjutnya masuk ke rantai makanan melalui proses bioakumulasi. Oleh karena sifat toksik dan persistensinya, polusi logam berat menjadi salah satu ancaman kesehatan lingkungan paling serius (Ebrahimi et al., 2020).

Kadmium (Cd) merupakan logam berat beracun yang bersifat bioakumulatif dalam tubuh manusia. Hasil penelitian ini menemukan bahwa konsentrasi Cd di udara ambien relatif rendah, dengan nilai terendah sebesar $0,0009 \mu\text{g}/\text{m}^3$ di kawasan Daya dan tertinggi sebesar $0,0092 \mu\text{g}/\text{m}^3$ di kawasan Cendrawasih. Walaupun nilainya masih rendah, sifat Cd yang akumulatif membuat paparan jangka panjang berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan, khususnya pada ginjal, hati, dan sistem endokrin (Chwalba et al., 2023b). Temuan ini sejalan dengan penelitian Suryati et al. (2019) yang menunjukkan variasi konsentrasi Cd di udara perkotaan bergantung pada intensitas lalu lintas dan aktivitas industri. Bahkan, studi Mahluddin et al. (2022) di Sungai Tallo menemukan kadar Cd dalam air, yang berpotensi menyumbang pencemaran udara melalui proses penguapan dan pembentukan aerosol.

Sebaliknya, Pb ditemukan sebagai logam paling dominan di udara perkotaan Makassar, dengan konsentrasi tertinggi $0,337 \mu\text{g}/\text{m}^3$ di kawasan Cendrawasih. Kondisi ini konsisten dengan temuan Khomenko et al. (2021), bahwa emisi kendaraan, keausan rem, dan debu jalanan merupakan sumber utama Pb di udara perkotaan. Walaupun kebijakan penghapusan bensin bertimbal telah diberlakukan, Pb masih dapat bertahan dalam bentuk legacy lead pada debu jalan, sehingga risiko paparan tetap tinggi.

Analisis intake menunjukkan bahwa proyeksi jangka panjang (*lifetime exposure*) memperlihatkan bahwa baik Cd maupun Pb melampaui ambang aman, menandakan risiko kesehatan kronis. Hal ini diperkuat oleh laporan WHO (2021) yang menyatakan bahwa tidak ada tingkat paparan Pb yang benar-benar aman karena bahkan konsentrasi rendah dapat menimbulkan efek neurotoksik.

Hasil perhitungan Hazard Quotient (HQ) semakin menegaskan hal ini. Cd menunjukkan nilai HQ <1 pada pajanan *realtime*, yang berarti risiko non-karsinogenik khususnya gangguan pertumbuhan pada anak dalam jangka pendek relatif rendah. Akan tetapi, pada proyeksi *lifetime*, HQ Cd meningkat melebihi 1 setelah 15 tahun pajanan berkelanjutan, menunjukkan risiko gangguan pertumbuhan yang nyata. Sebaliknya, Pb memperlihatkan nilai HQ yang sangat tinggi, baik pada paparan jangka pendek maupun panjang, dengan rata-rata HQ sebesar $7,25 \times 10^1$ dan maksimum $4,27 \times 10^2$. Bahkan pada proyeksi 30 tahun, HQ Pb meningkat hingga $>2,17 \times 10^3$. Hal ini mengindikasikan bahwa paparan Pb bersifat akut sekaligus kronis, dan efeknya bersifat permanen serta sulit dipulihkan (Richter et al., 2018).

Hasil perhitungan Hazard Quotient (HQ) menunjukkan bahwa terdapat perbedaan mendasar antara Cd dan Pb pada aspek jangka pendek dan jangka panjang. Pada paparan *realtime* (harian), nilai HQ Cd masih <1 , yang menandakan risiko non-karsinogenik khususnya gangguan pertumbuhan relatif rendah. Namun, proyeksi jangka panjang (*lifetime exposure*) menunjukkan bahwa HQ Cd meningkat hingga melebihi 1 setelah periode paparan lebih dari 15 tahun. Peningkatan HQ pada pajanan jangka panjang ini berkaitan dengan sifat Cd yang bioakumulatif, yaitu kecenderungan logam ini untuk menumpuk dalam jaringan tubuh seperti ginjal, hati, dan tulang. Dalam perspektif toksikologi, akumulasi Cd terjadi karena tubuh tidak memiliki mekanisme efektif untuk mengekskresinya, sehingga pajanan kecil sekalipun, bila berlangsung lama, dapat mencapai dosis kritis yang menimbulkan efek toksik. Efek utama Cd dalam jangka panjang adalah nefrotoksitas (kerusakan ginjal), osteotoksitas (keropos tulang), dan gangguan endokrin, termasuk penurunan kadar IGF-1 yang dapat menghambat pertumbuhan anak (Mexitalia et al., 2021).

Sementara itu, HQ Pb jauh lebih mengkhawatirkan. Pada paparan *realtime*, HQ Pb sudah melampaui 1, dengan nilai rata-rata $7,25 \times 10^1$ dan maksimum $4,27 \times 10^2$. Pada proyeksi *lifetime*, nilai HQ Pb meningkat sangat tajam hingga melampaui $2,17 \times 10^3$. Dari perspektif toksikologi, hal ini menunjukkan bahwa tidak ada ambang aman untuk Pb. Bahkan paparan rendah dalam jangka pendek sudah dapat menimbulkan efek kesehatan (Reuben et al., 2017), terutama pada anak, karena Pb bersifat

neurotoksin poten. Dalam tubuh, Pb dapat menggantikan kalsium pada tulang dan gigi, serta masuk ke otak melalui *blood–brain barrier*. Proses ini mengganggu perkembangan neuron, transmisi sinaptik, dan produksi neurotransmiter. Efeknya berupa penurunan IQ, gangguan kognitif, perubahan perilaku, serta peningkatan risiko gangguan neuropsikiatri pada usia dewasa (C. Liu & Park, 2024; Zartarian et al., 2017)

Peningkatan HQ pada paparan jangka panjang ini menggambarkan fenomena *cumulative risk*, di mana paparan rendah tetapi terus menerus dari lingkungan yang tercemar akhirnya menimbulkan dampak kesehatan serius. Anak jalanan termasuk kelompok paling rentan karena mereka menghabiskan waktu 7–12 jam per hari di jalanan, sehingga dosis paparan mereka jauh lebih tinggi dibanding anak pada umumnya. Dengan keterbatasan gizi dan akses kesehatan, kapasitas tubuh untuk menetralkan logam berat menjadi lebih rendah, sehingga risiko kesehatan akibat paparan Cd dan Pb semakin besar. Temuan ini mempertegas bahwa Cd merupakan pencemar dengan risiko kronis melalui akumulasi jangka panjang, sedangkan Pb merupakan pencemar dengan risiko akut sekaligus kronis yang dampaknya langsung terlihat bahkan pada paparan jangka pendek.

Perbedaan karakteristik toksikologi antara Cd dan Pb penting untuk diperhatikan. Cd lebih berbahaya dalam jangka panjang karena sifat akumulatifnya yang dapat mengganggu fungsi ginjal dan sistem endokrin. Sebaliknya, Pb menimbulkan risiko langsung sejak awal paparan karena sifat neurotoksikanya yang dapat menembus *blood–brain barrier* dan mengganggu perkembangan neuron serta sinaps otak. Dampaknya meliputi penurunan IQ, gangguan perilaku, serta hambatan perkembangan kognitif (C. Liu & Park, 2024). Selain itu, Cd juga berpotensi menurunkan kadar Insulin-like Growth Factor-1 (IGF-1), yang berperan penting dalam pertumbuhan linier anak, sehingga meningkatkan risiko stunting dan gangguan perkembangan fisik (Mexitalia et al., 2021)

Kondisi anak jalanan semakin diperburuk oleh faktor kerentanan sosial-ekonomi. Status gizi yang rendah, keterbatasan akses terhadap layanan kesehatan, serta lamanya waktu aktivitas di luar ruangan (7–12 jam/hari) memperbesar risiko kesehatan akibat paparan logam berat. Dengan demikian, anak jalanan mengalami beban ganda dimana kerentanan biologis terhadap polusi logam berat dan kerentanan sosial-ekonomi yang membatasi kemampuan mereka untuk mengurangi risiko. Situasi ini sesuai dengan konsep *multiple exposure vulnerability*, di mana kombinasi paparan lingkungan dan faktor sosial-ekonomi rendah menghasilkan dampak kesehatan yang lebih besar dibanding paparan tunggal (WHO, 2021).

2.5 Kesimpulan & Saran

2.5.1. Kesimpulan

Penelitian ini menemukan bahwa udara ambien di kawasan padat transportasi Kota Makassar telah tercemar logam berat, khususnya timbal (Pb) dan kadmium (Cd), dengan distribusi konsentrasi yang berbeda pada setiap lokasi. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa Pb merupakan logam dominan dengan kadar tertinggi mencapai $0,337 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sementara Cd ditemukan dalam kadar yang lebih

rendah, yaitu antara 0,0009–0,0092 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Meskipun konsentrasi Cd relatif rendah, sifatnya yang bioakumulatif menjadikannya berpotensi menimbulkan risiko gangguan pertumbuhan (gangguan pertumbuhan linear, Gangguan Endokrin (Disfungsi GH-IGF1) dan Gangguan Kognitif (Penurunan IQ) apabila paparan berlangsung dalam jangka panjang.

Analisis intake dan perhitungan Hazard Quotient (HQ) memperlihatkan perbedaan yang signifikan antara kedua logam ini. Cd pada paparan real life menunjukkan HQ <1 dimana dapat diartikan belum memberikan risiko gangguan Kesehatan pada anak jalanan, namun proyeksi *lifetime exposure* menunjukkan peningkatan nilai HQ > 1 hingga melampaui ambang aman, sehingga dapat diartikan bahwa Cd dalam jangka panjang berisiko menimbulkan gangguan Kesehatan pada anak jalanan dan pada analisis intake menunjukkan Batasan tidak aman pada real life dan life time dan analisis HQ menunjukkan nilai HQ yang sangat tinggi sejak paparan *realtime*, bahkan meningkat secara drastis hingga ribuan kali lipat pada paparan life time. Hal ini menegaskan bahwa tidak ada tingkat paparan Pb yang aman, mengingat sifatnya yang neurotoksik dan mampu menyebabkan penurunan IQ, gangguan perilaku, serta hambatan perkembangan kognitif pada anak.

Temuan ini juga menunjukkan bahwa anak jalanan merupakan kelompok paling rentan karena selain terpapar langsung polusi udara dalam waktu lama setiap hari, mereka juga menghadapi faktor kerentanan sosial-ekonomi seperti status gizi rendah dan keterbatasan akses kesehatan. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa Pb merupakan pencemar utama dengan risiko akut sekaligus kronis yang sangat berbahaya sejak jangka pendek, sedangkan Cd lebih menimbulkan risiko kumulatif dalam jangka panjang.

2.5.2. Saran

Melakukan pemodelan dispersi dan distribusi spasial berbasis Sistem Informasi Geografis (GIS) guna memetakan wilayah dengan tingkat risiko tinggi (hotspot polusi) di Kota Makassar. Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar upaya pencegahan paparan logam berat pada anak jalanan difokuskan pada tindakan sederhana yang dapat dilakukan dalam konteks aktivitas sehari-hari oleh anak jalanan itu sendiri dengan pendampingan relawan, pendamping sosial, serta tenaga kesehatan di tingkat pelayanan dasar. Mengingat tingginya risiko paparan timbal (Pb) bahkan pada paparan jangka pendek, maka pengurangan paparan dapat dilakukan dengan meminimalkan waktu berada di titik dengan kepadatan lalu lintas tinggi serta menghindari posisi yang terlalu dekat dengan sumber emisi kendaraan.

Untuk mengurangi paparan tidak langsung melalui debu yang terkontaminasi logam berat, diperlukan pembiasaan perilaku kebersihan diri, seperti mencuci tangan sebelum makan dan menghindari konsumsi makanan yang tidak terlindungi, yang dapat difasilitasi melalui edukasi sederhana oleh relawan atau tenaga kesehatan.

Sejalan dengan sifat kadmium (Cd) yang bioakumulatif dan berisiko dalam jangka panjang, upaya pencegahan dapat dilakukan melalui pengurangan paparan berulang serta penguatan kondisi biologis anak melalui pemenuhan asupan gizi dasar yang memadai, yang dapat didukung oleh keluarga, komunitas, maupun

program pelayanan kesehatan masyarakat. Dengan demikian, pendekatan pencegahan yang berbasis modifikasi perilaku sederhana dan penguatan kondisi individu ini diharapkan lebih memungkinkan untuk diterapkan secara bertahap sesuai dengan kondisi nyata anak jalanan.

2.5.3. Output Penelitian

Penelitian ini menghasilkan dataset mencakup hasil pengukuran langsung kadar Cd dan Pb di udara ambien menggunakan High Volume Sampler (HVS) pada enam titik lokasi di daerah padat transportasi kota Makassar dan Luaran penelitian ini telah dipublikasikan pada jurnal internasional terindeks sebagai bentuk diseminasi ilmiah

Daftar Pustaka

- Adams, S. V., Quraishi, S. M., Shafer, M. M., Passarelli, M. N., Freney, E. P., Chlebowski, R. T., Luo, J., Meliker, J. R., Mu, L., Neuhouser, M. L., & Newcomb, P. A. (2014). Dietary cadmium exposure and risk of breast, endometrial, and ovarian cancer in the Women's Health Initiative. *Environmental Health Perspectives*, 122(6), 594–600. <https://doi.org/10.1289/ehp.1307054>
- Aguilera, J., Konvinse, K., Lee, A., Maecker, H., Prunicki, M., Mahalingaiah, S., Sampath, V., Utz, P. J., Yang, E., & Nadeau, K. C. (2023). Air pollution and pregnancy. *Seminars in Perinatology*, October, 151838. <https://doi.org/10.1016/j.semperi.2023.151838>
- Ananda Jayalal, T. B., Jayaruwan Bandara, T. W. M. A., Mahawithanage, S. T. C., Wansapala, M. A. J., & Galappaththi, S. P. L. (2019). A quantitative analysis of chronic exposure of selected heavy metals in a model diet in a CKD hotspot in Sri Lanka. *BMC Nephrology*, 20(1), 208. <https://doi.org/10.1186/s12882-019-1371-5>
- Armijos, R. X., Weigel, M. M., Obeng-Gyasi, E., & Racines-Orbe, M. (2021). Elevated blood lead and metal/metalloid levels and environmental exposure sources in urban Ecuadorian school-age children and mothers. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 235(November 2020), 113770. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113770>
- Callan, A., Hinwood, A., & Devine, A. (2014). Metals in commonly eaten groceries in Western Australia: a market basket survey and dietary assessment. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 31(12), 1968–1981. <https://doi.org/10.1080/19440049.2014.973457>
- Chen, H., Zhan, C., Liu, S., Zhang, J., Liu, H., Liu, Z., Liu, T., Liu, X., & Xiao, W. (2022). Pollution Characteristics and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Street Dust from a Typical Industrial Zone in Wuhan City, Central China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(17), 10970. <https://doi.org/10.3390/ijerph191710970>
- Cheng, Z., Xu, S., Na, X., Zhang, X., Ma, D., & Zhang, P. (2022). Spatial-Heterogeneity Analysis of the Heavy Metals Cd and Pb in Road Dust in the Main Urban Area of Harbin. *Sustainability*, 14(13), 8007. <https://doi.org/10.3390/su14138007>
- Chwalba, A., Orłowska, J., Słota, M., Jeziorska, M., Filipecka, K., Bellanti, F., Dobrakowski, M., Kasperczyk, A., Zalejska-Fiolka, J., & Kasperczyk, S. (2023a). Effect of Cadmium on Oxidative Stress Indices and Vitamin D Concentrations in Children. *Journal of Clinical Medicine*, 12(4), 1572. <https://doi.org/10.3390/jcm12041572>
- Ebrahimi, M., Khalili, N., Razi, S., Keshavarz-Fathi, M., Khalili, N., & Rezaei, N. (2020). Effects of lead and cadmium on the immune system and cancer progression. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18(1), 335–343. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00455-2>
- He, H., Zhang, Z., & Li, M. (2022). Association between serum folate concentrations and blood lead levels in adolescents: A cross-sectional study. *Frontiers in Pediatrics*, 10, 941651. <https://doi.org/10.3389/fped.2022.941651>
- Ihsan, I. M., Yani, Moh., Hidayat, R., & Permatasari, T. (2021). Fluktuasi Cemaran Udara Partikulat dan Tingkat Risikonya terhadap Kesehatan Masyarakat Kota

- Bogor. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 22(1), 038–047. <https://doi.org/10.29122/jtl.v22i1.4439>
- Kao, C. S., Wang, Y. L., Jiang, C. Bin, Tai, P. J., Chen, Y. H., Chao, H. J., Lo, Y. C., Hseu, Z. Y., Hsi, H. C., & Chien, L. C. (2024). Assessment of sources and health risks of heavy metals in metropolitan household dust among preschool children: The LEAPP-HIT study. *Journal of Environmental Management*, 352(301), 120015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120015>
- Khomenko, S., Cirach, M., Pereira-Barboza, E., Mueller, N., Barrera-Gómez, J., Rojas-Rueda, D., de Hoogh, K., Hoek, G., & Nieuwenhuijsen, M. (2021a). Premature mortality due to air pollution in European cities: a health impact assessment. *The Lancet Planetary Health*, 5(3), e121–e134. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(20\)30272-2](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(20)30272-2)
- Kim, K., Melough, M. M., Kim, D., Sakaki, J. R., Lee, J., Choi, K., & Chun, O. K. (2021). Nutritional Adequacy and Diet Quality Are Associated with Standardized Height-for-Age among U.S. Children. *Nutrients*, 13(5), 1689. <https://doi.org/10.3390/nu13051689>
- Leonel, C., V, R. A., Romero-mart, M., Cantoral, A., Riojas-rodr, H., Bautista-arredondo, S., Bautista-arredondo, L. F., Castro, F. De, Tamayo-ortiz, M., & Mar, M. (2023). *Lead Exposure Can Affect Early Childhood Development and Could Be Aggravated by Stunted Growth : Perspectives from Mexico*.
- Lu, X., Lin, C., Li, W., Chen, Y., Huang, Y., Fung, J. C. H., & Lau, A. K. H. (2019). Analysis of the adverse health effects of PM_{2.5} from 2001 to 2017 in China and the role of urbanization in aggravating the health burden. *Science of the Total Environment*, 652, 683–695. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.140>
- Madani-Tonekaboni, M., Sadat aghayan, N., Rafiei Nazari, R., Mirzamohammadi, S., Abdolshahi, A., Abbasi-bastami, N., & Arabameri, M. (2019). Monitoring and Risk Assessment of Lead and Cadmium in Milks from East of Iran Using Monte Carlo Simulation Method. *Nutrition and Food Sciences Research*, 6(2), 29–36. <https://doi.org/10.29252/nfsr.6.2.29>
- Mallongi, A., Ane, R. La, & Birawida, A. B. (2017b). Spatial Lead Pollution in Aquatic Habitats and the Potential Risks in Makassar Coastal Area of South Sulawesi, Indonesia. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 16(2), 51. <https://doi.org/10.14710/jkli.16.2.51-55>
- Mansyur, M., Fitriani, D. Y., Prayogo, A., Mutiara, A., Putri, W. W., Aini, R., Fadhillah, R., Asep, Edna, S., Karmayana, A., Windarso, S. E., Hariojati, N., Susilorini, B., Rodriguez, A., & Bose-O-Reilly, S. (2024). *Lead Exposure and Indonesian Children's Health in Java Island* (Issue december 2023).
- Mexitalia, M., Pardede, B. K., Utari, A., & Mexitalia, M. (2021). Insulin-like growth factor-1 and growth in infants 0-6 months of age. *Paediatrica Indonesiana*, 61(2), 89–93. <https://doi.org/10.14238/pi61.2.2021.89-93>
- Mohammadian-Hafshejani, A., Farahmandian, P., Fadaei, A., & Sadeghi, R. (2024). Investigating the Relationship between Cadmium Exposure and the Risk of Prostate Cancer: A Systematic Review and Dose-Response Meta-Analysis. *Iranian Journal of Public Health*, 53(3), 553–567. <https://doi.org/10.18502/ijph.v53i3.15136>
- Reuben, A., Caspi, A., Belsky, D. W., Broadbent, J., Harrington, H., Sugden, K., Houts, R. M., Ramrakha, S., Poulton, R., & Moffitt, T. E. (2017). Association of Childhood Blood Lead Levels With Cognitive Function and Socioeconomic Status at Age 38 Years and With IQ Change and Socioeconomic Mobility

- Between Childhood and Adulthood. *JAMA*, 317(12), 1244. <https://doi.org/10.1001/jama.2017.1712>
- Richter, L. M., Orkin, F. M., Roman, G. D., Dahly, D. L., Horta, B. L., Bhargava, S. K., Norris, S. A., Stein, A. D., & investigators, C. (2018a). Comparative Models of Biological and Social Pathways to Predict Child Growth through Age 2 Years from Birth Cohorts in Brazil, India, the Philippines, and South Africa. *The Journal of Nutrition*, 148(8), 1364–1371. <https://doi.org/10.1093/jn/nxy101>
- Shi, J.-W., Fan, D.-X., & Li, M.-Q. (2023). The Relationship between Cadmium Exposure and Mortality in Postmenopausal Females: A Cohort Study of 2001-2018 NHANES. *Nutrients*, 15(21), 4604. <https://doi.org/10.3390/nu15214604>
- US EPA. (2021). *Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume III-Part A, Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment *134487**. www.epa.gov/superfund/RAGS3A/index.htm
- Zartarian, V., Xue, J., Tornero-Velez, R., & Brown, J. (2017). Children's Lead Exposure: A Multimedia Modeling Analysis to Guide Public Health Decision-Making. *Environmental Health Perspectives*, 125(9). <https://doi.org/10.1289/EHP1605>
- Zeng, X., Xu, X., Qin, Q., Ye, K., Wu, W., & Huo, X. (2019). Heavy metal exposure has adverse effects on the growth and development of preschool children. *Environmental Geochemistry and Health*, 41(1), 309–321. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0114-z>

BAB III

TOPIK PENELITIAN II

ANALISIS GANGGUAN PERTUMBUHAN PADA ANAK JALANAN AKIBAT PAPARAN KADMIMUM DAN TIMBAL DENGAN BIOMONITORING DARAH

3.1 Abstrak

Pendahuluan: Anak jalanan merupakan populasi rentan yang berpotensi mengalami paparan logam berat lebih tinggi akibat aktivitas yang dominan berlangsung di ruas jalan raya, diperburuk oleh kondisi sosial ekonomi rendah, status gizi marginal, serta keterbatasan akses layanan kesehatan. Kondisi tersebut meningkatkan risiko dampak kesehatan non-karsinogenik, khususnya gangguan pertumbuhan yang dapat dimanifestasikan melalui perubahan kadar hormon Insulin-like Growth Factor-1 (IGF-1). **Metode:** Penelitian ini menggunakan desain analitik dengan pendekatan potong lintang (cross-sectional) untuk menganalisis hubungan konsentrasi kadmium (Cd) dan timbal (Pb) di udara dengan kadar Cd dan Pb dalam darah, serta keterkaitannya dengan kadar IGF-1 pada anak jalanan. Analisis data dilakukan menggunakan uji korelasi Pearson dan regresi linear. **Hasil:** Analisis korelasi menunjukkan bahwa konsentrasi Cd di udara dengan kadar Cd dalam darah anak jalanan memiliki korelasi negatif sangat lemah dan tidak signifikan secara statistik ($r = -0,172$; $p = 0,189$), sementara konsentrasi Pb di udara dengan kadar Pb dalam darah menunjukkan korelasi positif sangat lemah dan tidak signifikan ($r = 0,041$; $p = 0,758$). Pada kelompok anak pra-pubertas (usia 3–6 tahun), kadar Pb menunjukkan korelasi positif sangat lemah terhadap kadar IGF-1 ($r = 0,185$; $p = 0,366$), sedangkan kadar Cd menunjukkan korelasi positif lemah namun tidak signifikan ($r = 0,168$; $p = 0,411$). Pada kelompok anak fase pubertas awal (usia 7–12 tahun), kadar Pb menunjukkan hubungan negatif lemah terhadap kadar IGF-1 dan tidak signifikan secara statistik ($r = -0,150$; $p = 0,278$), sedangkan kadar Cd menunjukkan hubungan negatif dengan kekuatan sedang dan signifikan secara statistik ($r = -0,292$; $p = 0,032$). Hasil analisis regresi linear menunjukkan bahwa variabel usia, berat badan, tinggi badan, dan kadar Pb tidak berhubungan signifikan dengan kadar IGF-1 ($F = -1,423$; $p = 0,226$; $R = 0,088$). **Kesimpulan:** Temuan ini mengindikasikan adanya potensi pengaruh kadmium terhadap penurunan kadar IGF-1, khususnya pada anak jalanan usia pubertas awal, meskipun sebagian besar hubungan yang diamati tidak signifikan secara statistik. Meskipun konsentrasi Cd dan Pb relatif rendah, sifat bioakumulatif logam berat tetap menjadi perhatian karena akumulasi jangka panjang berpotensi menimbulkan gangguan pertumbuhan dan dampak kesehatan kronis.

3.2 Pendahuluan

Pertumbuhan dan perkembangan anak merupakan aspek krusial dalam pembentukan kualitas sumber daya manusia di masa depan. Parameter biologis yang memiliki peranan penting dalam regulasi pertumbuhan adalah Insulin-like Growth Factor-1 (IGF-1) hormon peptida yang diproduksi oleh hati sebagai respons terhadap stimulasi Growth Hormone (GH). IGF-1 berfungsi dalam merangsang proliferasi, diferensiasi sel, sintesis protein, dan pertumbuhan linear jaringan tubuh, sehingga kadar IGF-1 menjadi indikator status pertumbuhan anak (Mexitalia et al., 2021). Lingkungan urban dengan kepadatan transportasi tinggi menjadi sumber utama paparan logam berat, terutama kadmium (Cd) dan timbal (Pb). Logam berat ini bersifat toksik, persisten, dan akumulatif. Paparan kronis, walau dalam kadar rendah, berpotensi menimbulkan dampak kesehatan serius. (C. Liu & Park, 2024)

Polusi udara dari emisi kendaraan bermotor merupakan tantangan kesehatan lingkungan yang utama di wilayah perkotaan yang padat penduduk. Kota Makassar di Indonesia memiliki kepadatan lalu lintas yang tinggi, yang berkontribusi terhadap tingginya kadar polutan udara, termasuk logam berat seperti kadmium (Cd) dan timbal (Pb). Logam-logam ini menjadi perhatian khusus karena dapat terakumulasi dalam tubuh manusia dan dikaitkan dengan berbagai dampak buruk bagi kesehatan, termasuk disfungsi ginjal, gangguan fungsi kognitif, gangguan kekebalan tubuh, dan retardasi pertumbuhan (Schwartz, Bind, dan Koutrakis 2017).

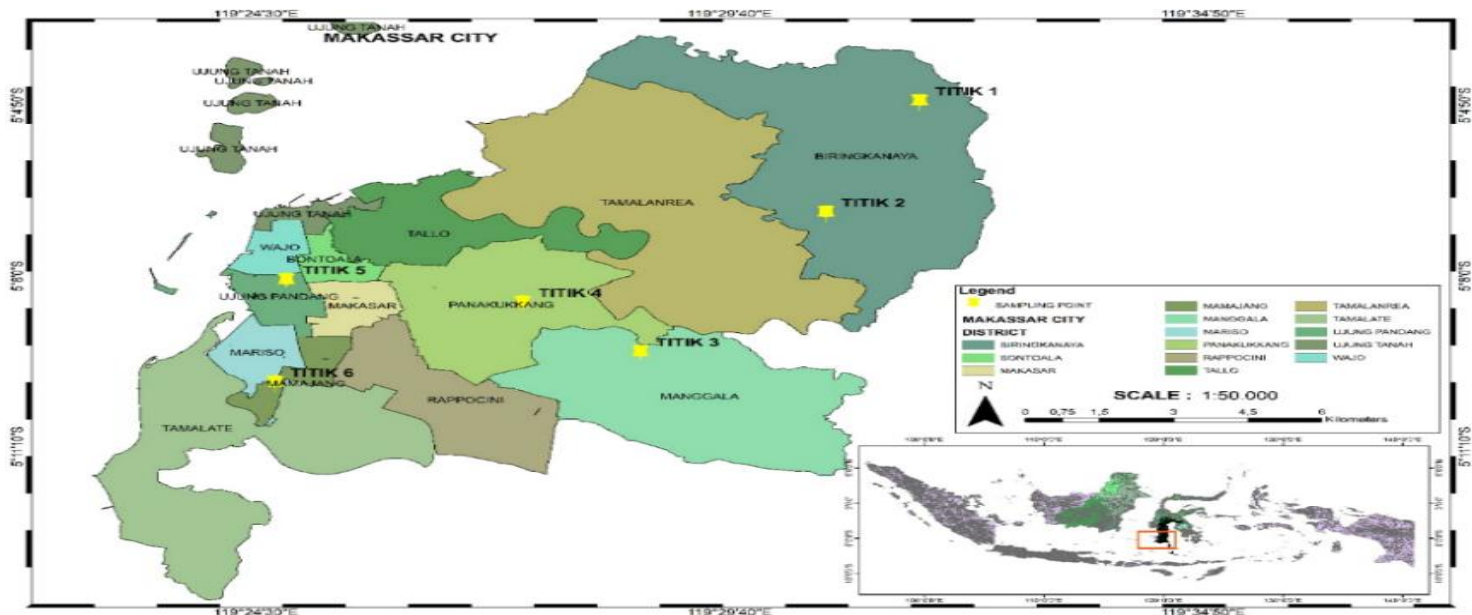
Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) dan Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (US-EPA) telah menetapkan batas ambang paparan logam berat. WHO merekomendasikan agar konsentrasi Pb di udara ambien tidak melebihi $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sementara Cd harus tetap di bawah $0,005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO.2021). Untuk penanda biologis, kadar Pb dalam darah anak-anak tidak boleh melebihi $5 \mu\text{g}/\text{dL}$, dan kadar Cd dalam darah harus tetap di bawah $1 \mu\text{g}/\text{L}$ (CDC, 2020). Nilai ambang batas ini menyoroti bahwa paparan kronis logam berat, bahkan pada tingkat rendah, menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan bagi kesehatan anak.

Dampak jangka panjang dari paparan logam berat tidak terbatas pada risiko karsinogenik, tetapi juga mencakup risiko non-karsinogenik, seperti gangguan pertumbuhan pada anak. Anak-anak lebih rentan terhadap efek toksik logam berat dibandingkan orang dewasa karena beberapa alasan. Secara fisiologis, anak-anak, jika dibandingkan dengan orang dewasa, menghirup udara lebih banyak setiap menit untuk setiap satu kilogram berat badan mereka, sehingga menyebabkan dosis udara tercemar yang dihirup lebih besar (Khomenko dkk., 2021). Mekanisme pertahanan biologis mereka, termasuk jalur detoksifikasi dan ekskresi ginjal, masih belum matang, sehingga mengakibatkan metabolisme dan eliminasi zat beracun yang kurang efisien (Zhao dkk., 2015). Anak jalanan sebagai populasi rentan mengalami konsentrasi paparan lebih tinggi karena aktivitas yang banyak berlangsung di ruas jalan raya, ditambah kondisi sosial ekonomi yang rendah, status gizi marginal, serta keterbatasan akses kesehatan, kelompok ini lebih rentan terhadap dampak non-karsinogenik berupa gangguan pertumbuhan, yang salah satunya termanifestasi melalui penurunan kadar IGF-1. Timbal dapat mengganggu sekresi GH melalui inhibisi fungsi hipofisis, serta memicu stres oksidatif yang menurunkan kadar IGF-1. Kadar IGF-1 yang lebih rendah dikaitkan dengan kadar timbal yang lebih tinggi pada anak dengan defisiensi hormon pertumbuhan (Y. Xu et al., 2014), kadmium diketahui bersifat nefrotoksik dan hepatotoksik, sehingga melemahkan fungsi hati sebagai organ utama produksi IGF-1, kadmium meningkatkan pembentukan Reactive Oxygen Species (ROS) yang berkontribusi pada disfungsi seluler dan regulasi hormonal (Ali EL-Hengary, 2023). Pengkajian ilmiah tentang analisis kadar IGF-1 pada anak jalanan yang terpapar kadmium dan timbal di daerah padat transportasi sangat dibutuhkan. Penelitian ini diharapkan memperkuat bukti keilmuan mengenai hubungan paparan logam berat dengan risiko gangguan pertumbuhan anak dan hasilnya dapat menjadi basis dalam merumuskan intervensi kesehatan dan kebijakan perlindungan anak yang lebih efektif.

3.3 Metode

3.3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mulai bulan April hingga Januari 2025, dengan lokasi penelitian berada di Kota Makassar. Kota Makassar, yang terletak di Provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia, juga dikenal dengan nama Ujung Pandang. Kota ini merupakan salah satu kota metropolitan di Indonesia dan sekaligus ibu kota Provinsi Sulawesi Selatan. Makassar dikenal memiliki tingkat kepadatan lalu lintas yang tinggi, terutama di pusat kota dan wilayah-wilayah dengan aktivitas ekonomi yang padat. Kawasan perkotaan merupakan wilayah yang memiliki kegiatan utama sebagai pusat permukiman, layanan pemerintahan, pelayanan sosial, serta berbagai aktivitas ekonomi. Penelitian ini dilakukan di lima kecamatan, dengan enam titik lokasi yang berada di kawasan transportasi. Titik-titik tersebut ditentukan berdasarkan data sekunder dari satuan lalu lintas poltabes kota Makassar.



Gambar 3 1 Lokasi Pengambilan sampel udara daerah padat transportasi dan sampel darah pada anak jalanan di daerah padat transportasi kota Makassar

Keterangan Lokasi Pengambilan Sampel udara Ambien

- Titik 1 : Sudiang (Kecamatan Biringkanaya)
- Titik 2 : Daya (Kecamatan Biringkanaya)
- Titik 3 : Antang (Kecamatan Manggala)
- Titik 4 : Panaikang (Kecamatan Panakkukang)
- Titik 5 : Sudirman (Kecamatan Ujung Pandang)
- Titik 6 : Cendrawasih (Kecamatan Mamajang)

3.3.2 Desain/Rancangan Penelitian

Studi ini menggunakan desain analitik dengan pendekatan *cross-sectional study*. Populasi target terdiri dari anak jalanan berusia 3–12 tahun yang tinggal atau melakukan aktivitas sehari-hari dalam radius 700 m dari enam lokasi dengan lalu lintas padat di kota Makassar. Pengambilan sampel kadar logam berat kadmium dan timbal di udara ambien, serta sampel subjek manusia, dilakukan dengan menggunakan rasio 1:10 berdasarkan prinsip *spatial exposure representativeness* (Lioy, 1990). Sampel dipilih dengan ketentuan bahwa responden bertempat tinggal kurang dari 700 meter dari lokasi titik pengambilan sampel udara ambien, serta bersedia berpartisipasi dalam kegiatan penelitian.

3.3.3 Populasi dan Sampel

Pemilihan lokasi didasarkan pada kepadatan lalu lintas, data zonasi perkotaan, dan aksesibilitas untuk keperluan pengambilan sampel lingkungan. Sebanyak 92 anak didekati, dan 80 anak setuju untuk berpartisipasi, menghasilkan tingkat respons sebesar 87,0%. Kriteria inklusi meliputi tempat tinggal atau aktivitas sehari-hari di dalam area studi yang ditentukan, kesediaan untuk berpartisipasi dengan persetujuan dari orang tua atau wali, dan tidak adanya penyakit akut selama pengambilan sampel. Kriteria eksklusi meliputi penolakan pengambilan sampel darah dan kuesioner yang tidak lengkap. Data dasar yang dikumpulkan meliputi usia, jenis kelamin, dan status gizi. "Populasi penelitian mencakup anak-anak yang berdomisili dan melakukan aktivitas sehari-hari di wilayah padat transportasi kota Makassar. Sampel Penelitian Sampel subjek adalah anak jalanan yang beraktivitas di kawasan padat transportasi dengan kriteria inklusi: berusia 3-12 tahun dan secara rutin berada di jalan untuk bekerja, beraktivitas, atau tinggal selama minimal lima tahun terakhir

3.3.4 Pengumpulan Data

Peneliti melakukan wawancara dengan menggunakan kuesioner berisi pertanyaan terstruktur yang diajukan kepada responden. Pertanyaan tersebut mencakup informasi mengenai karakteristik individu, seperti usia, jenis kelamin anak, pendidikan orang tua, pekerjaan orang tua, serta kondisi lingkungan tempat tinggal anak misalnya jarak antara rumah dan jalan raya atau lokasi titik pengambilan sampel.

3.3.4.1. Pengukuran kadar Cd dan Pb Pada darah anak jalanan

Prosedur pengambilan sampel darah dilakukan melalui teknik flebotomi sesuai dengan standar medis yang berlaku. Setelah dikumpulkan, sampel darah utuh disimpan pada suhu 4°C dan dikirim ke laboratorium untuk dianalisis. Sebanyak 1 mL darah utuh dicerna secara asam menggunakan 2 mL asam nitrat pekat dan 1 mL hidrogen peroksida pada suhu kamar selama 48 jam. Setelah proses pencernaan, sampel diencerkan hingga volume 10 mL menggunakan air deionisasi, kemudian

dianalisis menggunakan teknologi *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS) Thermo iCAP RQ dengan gas sel yang sesuai untuk menghilangkan gangguan ion molekul. Analisis dilakukan untuk menentukan kadar kadmium (Cd) dan timbal (Pb) dengan metode kalibrasi eksternal menggunakan standar internal yang relevan. Batas deteksi metode adalah 0,001 ng/mL untuk Cd dan 0,003 ng/mL untuk Pb.

3.3.4.2. Pengukuran kadar IGF-1 (Human Insulin-like Growth Factors 1)

Pengukuran kadar IGF-1 pada anak dilakukan menggunakan kit reagen ELISA (Cat. No. E0103Hu). Kit ini menggunakan metode *Enzyme-Linked Immunosorbent Assay* (ELISA) dengan pelat yang telah dilapisi antibodi spesifik terhadap *Human IGF-1*. Sampel yang mengandung IGF-1 ditambahkan ke dalam sumur sehingga berikatan dengan antibodi terlapisi. Selanjutnya, antibodi IGF-1 manusia yang dibiotinilasi ditambahkan dan berikatan dengan IGF-1 pada sampel. Streptavidin-HRP kemudian ditambahkan untuk berikatan dengan antibodi IGF-1 yang dibiotinilasi. Setelah inkubasi, komponen Streptavidin-HRP yang tidak terikat dibuang melalui proses pencucian. Larutan substrat ditambahkan sehingga menghasilkan perubahan warna yang sebanding dengan konsentrasi IGF-1 dalam sampel. Reaksi dihentikan dengan penambahan larutan penghenti asam, dan absorbansi diukur pada panjang gelombang 450 nm.

3.3.5 Analisis Data

Statistik deskriptif digunakan untuk meringkas karakteristik responden (usia, jenis kelamin dan status gizi) dan distribusi konsentrasi Cd dan Pb dalam sampel udara dan darah. Normalitas data dinilai menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov karena ukuran sampel melebihi 50. Perbedaan konsentrasi Cd dan Pb berdasarkan kelompok usia (Anak Usia Dini: 3–6 tahun dan Anak Usia Pertengahan: 7–12 tahun) dan jenis kelamin diperiksa menggunakan uji Mann-Whitney U atau uji Kruskal-Wallis. Hubungan antara konsentrasi Cd dan Pb di udara ambien dan konsentrasinya dalam darah dianalisis menggunakan uji korelasi Spearman, karena sebagian besar variabel tidak terdistribusi normal. Koefisien korelasi (r) diinterpretasikan sebagai berikut: 0–0,25 = sangat lemah, 0,26–0,50 = lemah, dan 0,51–0,75 = sedang. 0,76–1,00 = kuat. Signifikansi statistik ditetapkan pada $p < 0,05$.

3.4 Hasil dan pembahasan

3.4.1 Hasil Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis gangguan pertumbuhan pada anak jalanan yang diindikasikan melalui kadar insulin like growth factor-1 (IGF-1) akibat paparan kadmium dan timbal menggunakan biomonitoring darah di wilayah padat transportasi Kota Makassar. Pengambilan sampel udara dilakukan pada enam titik lokasi yang mewakili area dengan kepadatan lalu lintas tinggi, sementara sampel darah diperoleh dari 80 anak jalanan yang memenuhi kriteria penelitian. Selain itu, digunakan kuesioner sebagai instrumen tambahan guna memperoleh data mengenai karakteristik responden, pola aktivitas harian, serta kemungkinan paparan terhadap logam berat. Seluruh responden telah memberikan persetujuan dan bersedia mengisi kuesioner secara jujur sesuai kondisi sebenarnya.

Tabel 3.1 Karakteristik Sampel Penelitian Anak Jalanan di Kawasan Padat Penduduk Kota Makassar

Variabel	N=80 Mean	Kadar IGF- 1 (>450ng/ml)	Kadar cadmium (>0,0001mg/L)	Kadar Timbal (>0,05mg/l)
Umur (tahun) 3-12	8,75			
Early Childhood (3-6 Tahun)	26 (32.5)	24↑	18 ↑↑	19 ↑↑
Middle Childhood (7-12 tahun)	54 (67.5)	43↑	41 ↑↑	39 ↑↑
Jenis kelamin (L/P)				
Laki-laki	54 (32,5%)	41 ↑	38 ↑↑	36 ↑↑
Perempuan	26 (67,5 %)	26 ↑	21 ↑↑	22 ↑↑
Status pubertas				
Pra-pubertas (3-6 Tahun)	26 (32.5)	24 ↑	18 ↑↑	19 ↑↑
Early pubertas (7-12 Tahun)	54 (67.5)	43 ↑	41 ↑↑	39 ↑↑
Severely thinness : Z-score < -3 SD	2			
Thinness : -3 SD ≤ Z-score < -2 SD	10			
Normal : -2 SD ≤ Z-score ≤ +1 SD	65			
Overweight : > +1 SD sampai ≤ +2 SD	2			
Obese : > +2 SD	1			
IGF-1	80 556.11			
Pb	80 0,27			
Cd	80 0,002			

Sumber : Data Penelitian 2024

↑ = **Tinggi**↑↑= **Terpapar**

Tabel 3.1 menunjukkan hasil penelitian bahwa sampel terdiri dari 80 anak jalanan berusia 3–12 tahun dengan rata-rata usia 8,75 tahun. Sebagian besar berada pada kelompok usia sekolah dasar (*middle childhood*) dan mayoritas sudah memasuki tahap pubertas awal. Dari segi jenis kelamin, anak laki-laki lebih dominan dibandingkan perempuan, rata-rata berat badan, tinggi badan, lingkaran lengan, dan lingkaran perut : 23,03 kg; 121,43 cm; 17,08 cm; dan 55,40 cm. Status gizi menunjukkan sebagian besar anak berada pada kategori normal, meskipun masih terdapat kasus gizi kurang seperti *thinness* dan *severely thinness*, serta beberapa kasus kelebihan gizi (*overweight* dan obesitas). Nilai rata-rata IGF-1 tercatat sebesar 556,11, sedangkan paparan logam berat menunjukkan kadar timbal 0,27 dan kadmium 0,002, mayoritas anak memiliki status gizi normal, masih terdapat risiko gizi ganda serta potensi dampak kesehatan akibat paparan logam berat yang perlu menjadi perhatian.

Tabel 3.2 Analisis hubungan antara konsentrasi kadmium (Cd) di udara dengan kadarnya dalam darah anak jalanan di kawasan padat lalu lintas Kota Makassar.

Cd di udara	Cd di darah		
	r	p	CI 95% r
	- 0.172	0.189	-0.377 -0.050

Sumber; Data Penelitian, 2024 (Hasil Uji Statistik dengan korelasi Spearman (Lihat lampiran))

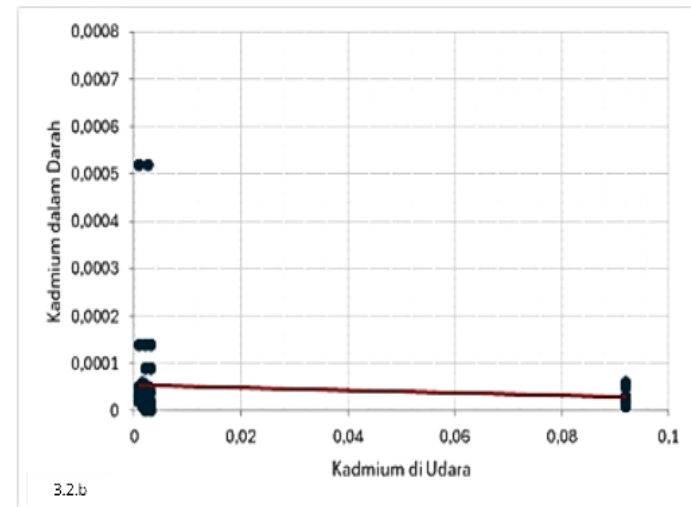
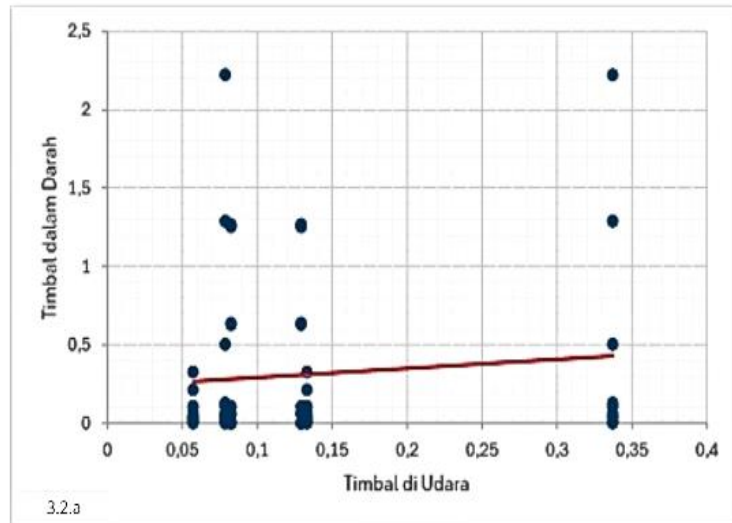
Berdasarkan Tabel 3.2 Berdasarkan hasil analisis, diperoleh nilai koefisien korelasi Spearman $r = 0,172$ dengan $p = 0,189$ dan interval kepercayaan 95% (-0,377 hingga 0,050). Hal ini menunjukkan adanya hubungan positif yang sangat lemah antara konsentrasi Cd di udara dengan kadar Cd dalam darah, namun tidak signifikan secara statistik ($p > 0,05$). Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat hubungan yang bermakna antara kedua variabel tersebut.

Tabel 3.3 Analisis hubungan antara konsentrasi timbal (Pb) di udara dengan kadarnya dalam darah anak jalanan di kawasan padat lalu lintas Kota Makassar.

Pb di udara	Pb di darah		
	r	p	CI 95% r
	0.041	0.758	0.180- 0.258

Sumber; Data Penelitian, 2024 (Hasil Uji Statistik dengan korelasi Spearman (Lihat lampiran))

Berdasarkan Tabel 3.3, Berdasarkan hasil analisis, diperoleh nilai koefisien korelasi Spearman antara konsentrasi timbal (Pb) di udara dengan kadar Pb dalam darah sebesar $r = 0,041$ dengan $p = 0,758$ dan interval kepercayaan 95% (-0,189 hingga 0,258), yang menunjukkan adanya hubungan positif yang sangat lemah. Namun, karena nilai $p > 0,05$ dan interval kepercayaan mencakup nol, maka hubungan tersebut tidak signifikan secara statistik, sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat hubungan yang bermakna antara konsentrasi Pb di udara dengan kadar Pb dalam darah.



Gambar 3 2 Diagram Sebar (Scatterplot) Hubungan antara kadar timbal(Pb) di udara dan kadar timbal(Pb) di darah anak jalanan pada daerah padat transportasi Kota Makassar(3.2.a) Hubungan antara kadar kadmium (Cd) di udara dan kadar kadmium(Cd) di dalam darah anak jalanan pada daerah padat Transportasi (3.2.b)Sumber : Hasil data dan uji statistic dengan metode uji korelasi Spearman (Lihat Lampiran)

Gambar 3.2 menampilkan diagram sebar (scatter plot) yang menggambarkan hubungan antara kadar logam berat di udara dengan kadar logam berat dalam darah anak jalanan pada daerah padat transportasi di Kota Makassar. Pada Gambar 3.2.a, terlihat hubungan antara kadar timbal (Pb) di udara dengan kadar timbal dalam darah. Pola penyebaran titik data tampak acak dan tidak menunjukkan kecenderungan linier yang jelas. Garis regresi yang sedikit menanjak menunjukkan arah hubungan positif yang sangat lemah. Hal ini sejalan dengan hasil uji korelasi Spearman yang menunjukkan nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,041 dan nilai signifikansi (p) sebesar 0,758, yang berarti tidak terdapat hubungan yang signifikan antara kadar timbal di udara dengan kadar timbal dalam darah anak jalanan. Sementara itu, Gambar 3.2.b menunjukkan hubungan antara kadar kadmium (Cd) di udara dengan kadar kadmium dalam darah. Titik-titik data pada scatter plot ini juga tersebar tidak beraturan, dengan garis regresi yang mendatar dan hampir tidak menunjukkan tren hubungan. Hasil ini didukung oleh nilai korelasi Spearman sebelumnya yaitu $r = -0,172$ dengan $p = 0,189$, yang menunjukkan adanya hubungan negatif lemah namun tidak signifikan secara statistik.

Tabel 3.4 Analisis hubungan usia dengan kadar kadmium (Cd) dan timbal (Pb) pada biomonitoring darah anak jalanan di kawasan padat lalu lintas Kota Makassar.

Usia	Cd di darah			Pb di darah		
	r	p	CI 95% r	r	p	CI 95% r
	-0.460	0,000	-0.617 -0.267	-0.103	0,432	-0.316 - 0.119

Sumber; Data Penelitian, 2025 (Hasil Uji Statistik dengan Uji Mann Whitney (Lihat lampiran))

Tabel 3.2 Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat hubungan antara usia dengan kadar kadmium (Cd) dalam darah anak jalanan, dengan koefisien korelasi sebesar $r = -0,460$ yang mengindikasikan hubungan negatif dengan kekuatan sedang, di mana peningkatan usia cenderung diikuti oleh penurunan kadar Cd dalam darah. Hubungan ini terbukti signifikan secara statistik ($p = 0,000$; $p < 0,05$) dan diperkuat oleh interval kepercayaan 95% (-0,617 hingga -0,267) yang tidak mencakup nol. Sebaliknya, hubungan antara usia dengan kadar timbal (Pb) dalam darah menunjukkan koefisien korelasi yang sangat lemah ($r = -0,103$) dengan arah negatif, namun tidak signifikan secara statistik ($p = 0,432$; $p > 0,05$), serta interval kepercayaan 95% (-0,316 hingga 0,119) yang mencakup nol, sehingga menunjukkan tidak adanya hubungan yang bermakna antara kedua variabel tersebut.

Tabel 3.5 Hubungan Kadar IGF-1 dengan kadar Cd dan Pb darah anak jalanan di daerah padat transportasi kota Makassar.

	Cd Darah			Pb Darah		
	r	p	CI 95% r value	r	p	CI 95% r
IGF-1	-0.139	0.220	-0.354-0.090	-0.040	0.724	-0.264-0.188

Pada Tabel 3.5 Hasil analisis menunjukkan bahwa hubungan antara kadar IGF-1 dengan kadar kadmium (Cd) dalam darah memiliki koefisien korelasi sebesar $r = -0,139$ yang mengindikasikan hubungan negatif sangat lemah. Hubungan ini tidak signifikan secara statistik ($p = 0,220$; $p > 0,05$), serta didukung oleh interval

kepercayaan 95% (-0,354 hingga 0,090) yang mencakup nol, sehingga menunjukkan tidak adanya hubungan yang bermakna antara kadar IGF-1 dan Cd dalam darah. Demikian pula, hubungan antara kadar IGF-1 dengan kadar timbal (Pb) dalam darah menunjukkan koefisien korelasi $r = -0,040$ yang juga menggambarkan hubungan negatif yang sangat lemah, dengan nilai signifikansi $p = 0,724$ ($p > 0,05$) dan interval kepercayaan 95% (-0,264 hingga 0,188) yang mencakup nol. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat hubungan yang signifikan antara kadar IGF-1 dengan kadar Cd maupun Pb dalam darah anak jalanan di kawasan padat lalu lintas Kota Makassar.

Tabel 3.6 Hubungan Kadar IGF-1 dengan kadar Cd dan Pb berdasarkan fase pra pubertas pada anak jalanan di daerah padat transportasi kota Makassar.

Pra-pubertas (3-6 th)	Cd			Pb		
	r	p	CI 95% r value	r	p	CI 95% r
IGF-1	0.168	0.411	-0.246 0.419	- 0.185	0.366	-0.230 – 0.543

Sumber; Data penelitian 2024* Uji Korelasi Spearman

Pada Tabel 3.6 Berdasarkan hasil analisis korelasi pada kelompok anak pra-pubertas (usia 3–6 tahun), diketahui bahwa hubungan antara kadar IGF-1 dengan kadar kadmium (Cd) dalam darah menunjukkan koefisien korelasi sebesar $r = 0,168$ yang mengindikasikan hubungan positif sangat lemah dan tidak signifikan secara statistik ($p = 0,411$; $p > 0,05$), dengan interval kepercayaan 95% (-0,246 hingga 0,419) yang mencakup nol. Demikian pula, hubungan antara kadar IGF-1 dengan kadar timbal (Pb) dalam darah menunjukkan koefisien korelasi $r = 0,185$ yang juga mencerminkan hubungan positif sangat lemah dan tidak signifikan ($p = 0,366$; $p > 0,05$), dengan interval kepercayaan 95% (-0,230 hingga 0,543) yang mencakup nol. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pada kelompok anak pra-pubertas tidak terdapat hubungan yang bermakna antara kadar IGF-1 dengan kadar Cd maupun Pb dalam darah.

Tabel 3.7 Hubungan Kadar IGF-1 dengan kadar Cd dan Pb berdasarkan fase pra pubertas pada anak jalanan di daerah padat transportasi kota Makassar

pubertas awal (7-12 th)	Cd			Pb		
	r	p	CI 95% r value	r	p	CI 95% r
IGF-1	-0.292	0.032	-0,525-0,018	-0,15	0.278	-0.409– 0.130

Sumber; Data penelitian 2024* Uji Korelasi Spearman

Pada tabel 3.7 Berdasarkan hasil analisis korelasi pada kelompok pubertas awal (usia 7–12 tahun), diketahui bahwa hubungan antara kadar IGF-1 dengan kadar kadmium (Cd) dalam darah menunjukkan koefisien korelasi sebesar $r = -0,292$ yang mengindikasikan hubungan negatif dengan kekuatan lemah, serta signifikan secara

statistik ($p = 0,032$; $p < 0,05$). Interval kepercayaan 95% (-0,525 hingga -0,018) yang tidak mencakup nol semakin memperkuat adanya hubungan yang bermakna, di mana peningkatan kadar Cd cenderung diikuti oleh penurunan kadar IGF-1. Sebaliknya, hubungan antara kadar IGF-1 dengan kadar timbal (Pb) dalam darah menunjukkan koefisien korelasi $r = -0,15$ yang mencerminkan hubungan negatif sangat lemah dan tidak signifikan secara statistik ($p = 0,278$; $p > 0,05$), dengan interval kepercayaan 95% (-0,409 hingga 0,130) yang mencakup nol. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pada kelompok pubertas awal terdapat hubungan negatif yang signifikan antara kadar IGF-1 dan Cd, namun tidak terdapat hubungan yang bermakna antara kadar IGF-1 dan Pb dalam darah.

Tabel 3.8 Hubungan Kadar IGF-1 dengan status Gizi pada anak jalanan di daerah padat transportasi kota Makassar

		Cd			Pb		
		r	p	CI 95% r	r	p	CI 95% r
Normal (≥ -2 SD $\leq +1$ SD)	IGF-1	-0.136	0.280	- 0.374- 0.119	-0.064	0.610	- 0.310- 0.189
Kurus (≥ -3 SD < -2 SD)		-0.141	0.698	- 0.718- 0.552	-0.055	0.880	- 0.674- 0.609

Berdasarkan hasil analisis korelasi yang disajikan pada Tabel 3.8 diketahui bahwa pada kelompok anak dengan status gizi normal (Z-score IMT/U ≥ -2 SD sampai $\leq +1$ SD), kadar kadmium (Cd) menunjukkan korelasi negatif sangat lemah terhadap kadar hormon *Insulin-like Growth Factor-1* (IGF-1) dengan nilai $r = -0,136$. Sementara itu, kadar timbal (Pb) juga memperlihatkan korelasi negatif sangat lemah terhadap kadar IGF-1 dengan nilai $r = -0,064$ dimana menunjukkan kecenderungan bahwa peningkatan kadar Cd maupun Pb diikuti oleh penurunan kadar IGF-1, meskipun kekuatan hubungan yang sangat lemah mengindikasikan bahwa hubungan tersebut relatif kecil.

Pada kelompok anak dengan status gizi kurus (Z-score IMT/U ≥ -3 SD sampai < -2 SD), kadar Cd menunjukkan korelasi negatif sangat lemah terhadap kadar IGF-1 dengan nilai $r = -0,141$. Demikian pula, kadar Pb memperlihatkan korelasi negatif sangat lemah terhadap kadar IGF-1 dengan nilai $r = -0,055$. Dimana pada kedua logam berat tersebut menunjukkan kecenderungan penurunan kadar IGF-1 seiring dengan meningkatnya kadar Cd dan Pb, namun besarnya koefisien korelasi menunjukkan bahwa hubungan yang terjadi bersifat sangat lemah.

Tabel 3.9 Analiais Kadar Cd,Pb, usia,berat badan,tinggi badan dengan IGF-1 menggunakan biomonitoring darah pada anak jalanan di daerah padat transportasi kota Makassar.

Variabel	IGF-1		
	F	P Simultan	Nilai R
Usia,Berat badan,Tinggi badan, Timbal	-1.423	0.226	0.088
Usia,Berat badan,Tinggi badan, Cadmium	0.946	0.442	0.048
Usia,Berat badan,Tinggi badan, Cadmium dan timbal	1.730	0.152	0.084

Sumber ; Data Penelitian 2024. Uji regresi Linear

Hasil analisis regresi linear menunjukkan bahwa variabel usia, berat badan, tinggi badan, serta kadar timbal (Pb) tidak memiliki hubungan yang signifikan dengan kadar IGF-1 pada anak jalanan ($F = -1,423$; $p = 0,226$; $R = 0,088$). Demikian pula, usia, berat badan, tinggi badan, dan kadar cadmium (Cd) tidak menunjukkan hubungan bermakna terhadap IGF-1 ($F = 0,946$; $p = 0,442$; $R = 0,048$). Ketika seluruh variabel dimasukkan secara simultan, yaitu usia, berat badan, tinggi badan, kadar Cd, dan Pb, hasil analisis juga tidak menunjukkan hubungan signifikan dengan kadar IGF-1 ($F = 1,730$; $p = 0,152$; $R = 0,084$). Dengan demikian, temuan ini mengindikasikan bahwa tidak terdapat pengaruh antara faktor antropometri dan paparan logam berat terhadap kadar IGF-1 pada anak jalanan dalam penelitian ini.

3.4.2 Pembahasan

Studi ini mengkaji paparan kadmium (Cd) dan timbal (Pb) serta analisis kadar IGF-1 pada anak jalanan yang tinggal di daerah padat transportasi di Kota Makassar. Penelitian ini menemukan korelasi yang sangat lemah antara konsentrasi Cd dan Pb di lingkungan ambien dan Cd dan Pb di darah anak jalanan, namun, terdapat hubungan negatif yang signifikan antara usia dan kadar Cd dalam darah dimana menunjukkan konsentrasi Cd yang lebih tinggi pada anak-anak yang lebih muda. Penelitian ini juga menunjukkan korelasi yang sangat lemah antara konsentrasi Pb ambien dan kadar Pb darah dan hubungan negatif yang lemah antara konsentrasi Cd ambien dan kadar Cd darah yang menunjukkan bahwa konsentrasi udara ambien saja mungkin tidak secara substansial memengaruhi kadar Cd dan Pb darah pada anak jalanan.

Sangat lemahnya hubungan antara kadar Cd dan Pb di udara dengan kadar logam dalam darah anak jalanan dapat disebabkan oleh perbedaan kondisi lingkungan di setiap lokasi dan waktu. Selain dari udara, anak-anak juga bisa terpapar logam berat melalui debu, makanan, atau benda yang mereka sentuh setiap hari, sehingga kadar logam dalam darah tidak hanya dipengaruhi oleh udara yang mereka hirup. Hal ini menegaskan bahwa udara ambien bukan satu-satunya penentu kadar logam berat dalam darah, dan bahwa faktor lingkungan serta kondisi sosial anak jalanan memiliki peranan dominan dalam menentukan besarnya paparan yang mereka alami. (Fattoruso et al., 2022).

Terdapat hubungan negatif dengan korelasi sedang antara usia dan kadar kadmium (Cd) dalam darah anak jalanan, menunjukkan bahwa semakin muda usia anak, semakin tinggi kadar Cd dalam darah, sedangkan pada anak yang lebih tua kadar Cd cenderung lebih rendah, kecenderungan anak usia muda yang memiliki kerentanan biologis lebih tinggi terhadap penyerapan logam berat, kapasitas detoksifikasi tubuh yang belum optimal, serta perilaku yang meningkatkan paparan lingkungan, seperti bermain di area jalanan atau kontak langsung dengan debu, sebaliknya kadar Pb darah menunjukkan hubungan yang sangat lemah dan tidak signifikan dengan usia yang mengindikasikan bahwa usia tidak memiliki pengaruh yang berarti terhadap kadar Pb dalam darah anak jalanan.

Dari hasil penelitian ini menunjukkan paparan Pb relatif seragam pada berbagai kelompok usia anak jalanan dalam penelitian ini, yang kemungkinan besar disebabkan oleh sumber paparan yang sama di lingkungan mereka, seperti asap kendaraan bermotor atau debu jalanan. Selain itu, variabel jenis kelamin juga menunjukkan pengaruh yang kecil terhadap kadar Cd maupun Pb dalam darah, yang dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat perbedaan bermakna antara anak laki-laki dan perempuan dalam hal akumulasi logam berat. Temuan ini menunjukkan bahwa faktor lingkungan dan perilaku paparan kemungkinan memiliki peran yang lebih dominan dibandingkan faktor biologis seperti usia atau jenis kelamin dalam menentukan kadar logam berat dalam darah anak jalanan di kawasan padat lalu lintas.

Karakteristik sampel menunjukkan bahwa anak jalanan yang diteliti dengan rentang usia 3–12 tahun dan rata-rata usia 8,75 tahun, sebagian besar berada memasuki fase pubertas awal, dengan proporsi anak laki-laki lebih tinggi dibanding perempuan. Status gizi sebagian besar anak berada pada kategori normal, meskipun masih ditemukan beberapa kasus kurang gizi seperti *thinness* dan *severely thinness*, serta kasus gizi lebih berupa *overweight* dan obesitas.

Status gizi yang buruk akan meningkatkan kerentanan anak terhadap paparan logam berat karena cadangan protein dan mineral esensial dalam tubuh berkurang, protein berperan sebagai bahan dasar sintesis enzim dan protein pengikat logam (seperti metalotionein) yang berfungsi dalam proses detoksifikasi Cd dan Pb dan juga sebagai substrat dalam jalur metabolisme anabolik yang mendukung produksi IGF-1 di hati (Cusick et al., 2018). Kekurangan protein menyebabkan produksi metalotionein menurun, sehingga kapasitas tubuh untuk mengikat dan menetralkan logam berat juga berkurang. Akibatnya, logam berat lebih mudah berinteraksi dengan enzim dan membran sel, memicu stres oksidatif, dan mengganggu fungsi seluler, termasuk hepatosit yang menjadi tempat utama produksi IGF-1, asupan energi yang cukup dibutuhkan untuk mendukung proses transkripsi dan translasi gen IGF-1 (Bharatraj & Yathapu, 2018).

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa paparan Cd dan Pb pada anak fase pra-pubertas belum menunjukkan pengaruh yang bermakna terhadap kadar IGF-1. Kondisi ini kemungkinan disebabkan karena pada fase pertumbuhan awal, aktivitas hormon pertumbuhan masih berada dalam kisaran fisiologis normal dan lebih dipengaruhi oleh faktor genetik serta nutrisi dasar dibandingkan paparan logam berat, adanya arah korelasi positif menggambarkan respons adaptif awal tubuh

terhadap paparan logam berat dosis rendah sebelum menimbulkan efek penurunan kadar IGF-1 pada paparan jangka panjang(Tabel 3.2).

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa peningkatan kadar Cd dalam darah berkorelasi dengan penurunan kadar IGF-1 yang menandakan bahwa paparan Cd mulai memberikan pengaruh biologis terhadap fungsi endokrin pada fase pubertas awal, Cd dapat mengganggu poros GH-IGF-1 melalui mekanisme stres oksidatif dan hambatan sintesis hormon di hati, sehingga dapat menghambat pertumbuhan linear anak dan paparan Pb belum menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap kadar IGF-1, meskipun arah korelasinya tetap negative dimana hal ini dapat mengindikasikan potensi gangguan endokrin tingkat awal (*early endocrine disturbance*) yang belum terdeteksi secara klinis, namun dapat berkembang menjadi disfungsi hormonal yang nyata apabila pajanan Pb berlangsung secara kronik dan terakumulasi dalam jaringan biologis. (Tabel 3.2)

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa paparan Cd dan Pb belum memberikan pengaruh yang bermakna terhadap kadar IGF-1 pada anak jalanan di daerah padat transportasi. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun terdapat kecenderungan penurunan kadar IGF-1 seiring peningkatan kadar logam berat, hubungan tersebut masih bersifat biologis ringan dan belum signifikan secara statistik. Kemungkinan hal ini disebabkan oleh variasi individu, perbedaan durasi pajanan, serta faktor lain seperti status gizi dan fungsi hormon pertumbuhan yang turut memengaruhi kadar IGF-1. Meskipun demikian, arah korelasi negatif tetap menunjukkan potensi awal terjadinya gangguan fungsi endokrin apabila paparan Cd dan Pb berlangsung kronik dan terakumulasi dalam jaringan tubuh (Tabel 3.3).

Hasil dari penelitian ini mengindikasikan bahwa kontribusi gabungan variabel-variabel tersebut terhadap perubahan kadar IGF-1 sangat kecil. Hal ini menunjukkan bahwa kadar IGF-1 pada anak jalanan lebih dipengaruhi oleh faktor lain seperti status gizi, asupan protein, dan aktivitas hormon pertumbuhan (GH) dibandingkan oleh paparan logam berat. Meskipun Cd dan Pb berpotensi menekan sintesis IGF-1 melalui mekanisme stres oksidatif dan gangguan fungsi hati-hipofisis, pengaruh tersebut belum tampak signifikan secara statistik karena paparan kemungkinan masih bersifat ringan atau belum berlangsung kronik(Tabel 3.4). Pada anak usia dini, paparan logam berat belum menunjukkan efek nyata terhadap penurunan kadar IGF-1, karena regulasi hormonal pada fase ini masih cukup stabil untuk mempertahankan homeostasis pertumbuhan(Shin et al., 2024).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun nilai Cd dan Pb relatif rendah, sifat bioakumulatif logam berat tetap menimbulkan kekhawatiran karena dapat terakumulasi dalam jaringan dan menimbulkan gangguan kesehatan jangka Panjang(Shezi et al., 2024). Secara patofisiologi, Pb dapat mengganggu metabolisme enzim melalui ikatan dengan gugus sulfhidril, menghambat pembentukan heme, serta memengaruhi homeostasis kalsium pada tulang, sehingga pertumbuhan anak dapat terganggu(Sadhu et al., 2024). Sebaliknya, Cd memiliki efek yang lebih kuat terhadap sistem hormonal karena dapat menimbulkan stres oksidatif, meningkatkan produksi radikal bebas, serta mengaktifkan sitokin

proinflamasi yang pada akhirnya menekan jalur transduksi sinyal hormon pertumbuhan (GH–IGF-1 axis) di hati (Fu & Xi, 2020; Genchi et al., 2020).

Dari hasil penelitian ini didapatkan kadar IGF-1 memiliki arah korelasi negatif dengan kadar Cd dan Pb dalam darah anak jalanan di daerah padat transportasi Kota Makassar, artinya, ketika kadar Cd atau Pb dalam darah meningkat, kadar IGF-1 cenderung menurun, meskipun hubungan tersebut tidak signifikan secara statistik (Tabel 3.5), arah korelasi negatif ini tetap relevan karena IGF-1 merupakan biomarker sensitif terhadap gangguan lingkungan, khususnya paparan logam berat. Cd dapat mengganggu fungsi hepatoseluler dan jalur sinyal growth hormone–IGF-1 axis melalui peningkatan stres oksidatif dan inflamasi ringan kronis, yang pada akhirnya berpotensi menurunkan sintesis IGF-1 di hepar (Genchi et al., 2020; Thevenod, 2009) al., 2020). Oleh karena itu, kecenderungan penurunan IGF-1 seiring peningkatan Cd darah dapat mencerminkan efek biologis awal (subklinis) dari paparan Cd kronis dosis rendah.

Arah korelasi negatif antara IGF-1 dan Pb (Tabel 3.5) konsisten dengan bukti biomedik terbaru yang menunjukkan bahwa Pb dapat memengaruhi regulasi neuroendokrin, khususnya melalui gangguan fungsi hipotalamus–hipofisis yang berperan dalam sekresi hormon pertumbuhan (GH). Paparan Pb dilaporkan meningkatkan stres oksidatif sistemik dan mengganggu homeostasis kalsium, yang secara tidak langsung dapat menurunkan bioavailabilitas dan aktivitas biologis IGF-1 (Flora et al., 2012; D. Liu et al., 2023). Paparan Pb pada anak berhubungan dengan gangguan pertumbuhan dan perubahan biomarker pertumbuhan, meskipun efeknya sering kali bersifat ringan dan tidak selalu signifikan secara statistik (Mansyur, Fitriani., et al., 2024)

Mekanisme kompensasi fisiologis pada anak, serta pengaruh faktor perancu seperti status gizi, usia, dan fase pertumbuhan yang sangat memengaruhi kadar IGF-1. Namun demikian, konsistensi arah korelasi negatif antara IGF-1 dengan Cd dan Pb mendukung hipotesis biomedik bahwa paparan logam berat lingkungan berpotensi mengganggu regulasi faktor pertumbuhan. Temuan ini menegaskan pentingnya penggunaan biomarker endokrin sebagai indikator dini dampak paparan logam berat pada populasi anak yang hidup di lingkungan berisiko tinggi.

Logam berat Pb tidak secara langsung menekan produksi IGF-1. Efek toksik Pb lebih dominan pada sistem saraf pusat, sistem hematopoietik, serta metabolisme kalsium, dampak utama paparan Pb pada anak-anak adalah gangguan kognitif, dan hematologis, sementara efeknya terhadap sistem hormonal relatif tidak konsisten (Sang et al., 2022; Yao et al., 2019). Hal ini mendukung temuan penelitian ini bahwa Pb tidak menunjukkan hubungan yang signifikan dengan kadar IGF-1 baik pada pra-pubertas maupun pubertas awal (Tabel 3.6) sedangkan Cd lebih berpotensi memengaruhi poros GH–IGF-1 dibanding Pb, terutama pada fase pubertas awal yang sedang mengalami pertumbuhan cepat (Tabel 3.7). Temuan ini memperkuat bukti bahwa anak usia pubertas lebih rentan terhadap dampak toksik Cd, dan kondisi tersebut dapat berimplikasi serius terhadap pertumbuhan linier dan perkembangan

pubertas anak jalanan di daerah padat transportasi (Genchi et al., 2020c; Kippler et al., 2016).

Pada anak jalanan dengan status gizi normal maupun kurus, peningkatan kadar Cd dan Pb dalam darah cenderung diikuti oleh penurunan kadar IGF-1, meskipun hubungan yang ditemukan sangat lemah dan tidak signifikan secara statistik (Tabel 3.8), pola hubungan berlawanan arah ini tetap relevan karena IGF-1 merupakan mediator utama pertumbuhan dan metabolisme yang sensitif terhadap gangguan lingkungan, termasuk paparan logam berat. Dimana paparan Cd kronis dosis rendah dapat menginduksi stres oksidatif dan disfungsi hepatoseluler, yang berpotensi mengganggu jalur sinyal growth hormone–IGF-1 axis, sehingga menurunkan sintesis IGF-1 tanpa menimbulkan perubahan klinis yang jelas (Genchi et al., 2020b; Thevenod, 2009). Pada anak dengan status gizi kurus, defisit nutrisi menyebabkan keterbatasan energi, protein, dan mikronutrien yang diperlukan untuk proses anabolik, sehingga tubuh melakukan adaptasi endokrin dengan menekan sumbu pertumbuhan. Adaptasi ini ditandai dengan penurunan produksi dan aktivitas insulin-like growth factor-1 (IGF-1) sebagai mekanisme penghematan energi. Kondisi tersebut dapat meningkatkan kerentanan terhadap stresor tambahan, termasuk paparan logam berat, karena sistem metabolik dan hormonal telah berada dalam keadaan tertekan.

Pb dan Cd mampu bertindak sebagai pengganggu endokrin (endocrine disruptor) yang dapat menghambat fungsi hormon pertumbuhan, meningkatkan stres oksidatif, serta memengaruhi regulasi sintesis IGF-1 (Lemaire et al., 2020; D. Liu et al., 2023; Satarug et al., 2020). Hasil penelitian yang tidak signifikan dapat juga dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain, heterogenitas tingkat paparan, serta adanya variabel perancu seperti usia, status gizi, dan kondisi kesehatan responden yang juga memengaruhi kadar IGF-1.

Hasil analisis regresi linear menunjukkan bahwa usia, berat badan, tinggi badan, serta kadar Cd dan Pb dalam darah, baik dianalisis secara parsial maupun simultan, tidak berhubungan signifikan dengan kadar IGF-1 pada anak jalanan di daerah padat transportasi Kota Makassar, dengan nilai koefisien determinasi yang rendah ($R = 0,048-0,088$), yang menandakan kontribusi faktor antropometri dan paparan logam berat terhadap variasi IGF-1 relatif kecil (tabel 3.8). Sifat regulasi IGF-1 yang sangat kompleks dan dikendalikan secara ketat melalui sumbu growth hormone–IGF-1, di mana produksi IGF-1 di hepar lebih dipengaruhi oleh status nutrisi, keseimbangan energi, fase pubertas, dan adaptasi hormonal dibandingkan ukuran tubuh atau usia kronologis semata (Møller & Jørgensen, 2016; Rosenfeld et al., 2020). Tidak signifikkannya hubungan Cd dan Pb dengan IGF-1 sejalan dengan bukti bahwa efek logam berat terhadap sistem endokrin umumnya bersifat subklinis dan kumulatif, bekerja melalui mekanisme tidak langsung seperti stres oksidatif, inflamasi ringan kronis, dan gangguan sensitivitas jaringan terhadap hormon pertumbuhan, sehingga dampaknya terhadap kadar IGF-1 sering kali tidak terdeteksi pada desain potong lintang atau pada paparan dosis rendah (Genchi et al., 2020; Liu et al., 2021). Selain itu, adanya mekanisme kompensasi fisiologis memungkinkan tubuh anak

mempertahankan kadar IGF-1 dalam kisaran tertentu meskipun terpapar stres lingkungan, selama kebutuhan energi dan nutrisi dasar relatif terpenuhi, sehingga hubungan sinergistik antara faktor antropometri dan paparan logam berat terhadap IGF-1 tidak tampak secara signifikan dalam penelitian ini (Page et al., 2025).

Hal ini selaras dengan karakteristik toksisitas Pb yang lebih dominan menimbulkan efek neurotoksik dan hematotoksik dibandingkan dengan gangguan langsung pada regulasi hormon pertumbuhan. Pb bersifat neurotoksik dan hematotoksik. Pb berikatan dengan gugus sulfhidril (-SH) pada protein sehingga menginaktivasi berbagai enzim penting, termasuk enzim dalam jalur biosintesis heme seperti δ -aminolevulinic acid dehydratase (ALAD) dan ferrochelataase. Akibatnya, terjadi akumulasi prekursor toksik dan anemia (Himani et al., 2020; Mazumdar et al., 2017). Walaupun Pb dapat mengganggu metabolisme kalsium (Ca^{2+}) melalui kompetisi pada kanal ion, efeknya terhadap jalur transduksi hormon pertumbuhan tidak terlalu kuat, paparan Pb pada anak-anak lebih sering dikaitkan dengan gangguan kognitif dan hematologis daripada perubahan hormon pertumbuhan (Nwobi et al., 2021; Rachmat et al., 2020). Temuan ini mendukung hasil penelitian ini yang menunjukkan hubungan Pb dengan IGF-1 sangat lemah dan tidak signifikan.

Cd memiliki mekanisme yang lebih jelas dibanding Pb dalam menekan produksi IGF-1. Cd meningkatkan pembentukan Reactive Oxygen Species (ROS) seperti superoksida (O_2^-), hidrogen peroksida (H_2O_2), dan radikal hidroksil (-OH). Peningkatan ROS ini memicu stres oksidatif yang merusak membran sel hepatosit, protein, dan DNA. Selain itu, Cd mengganggu homeostasis mineral penting seperti zink (Zn) dan kalsium (Ca), yang berperan penting dalam fungsi reseptor GH dan aktivitas enzim transduksi sinyal. Kompetisi Cd dengan Zn menurunkan stabilitas reseptor GH, sehingga pengikatan GH dengan reseptor menjadi kurang efektif. Lebih jauh lagi, Cd menghambat fosforilasi STAT5 dalam jalur JAK2/STAT5, yaitu jalur utama yang menghubungkan stimulasi GH dengan transkripsi gen IGF-1 di hati. Akibatnya, transkripsi mRNA IGF-1 menurun, yang secara langsung berdampak pada penurunan kadar IGF-1 (Ali EL-Hengary, 2023; Dehkhoda et al., 2018).

Dengan demikian, meskipun hasil penelitian ini tidak menunjukkan signifikansi statistik, arah hubungan negatif tetap relevan secara biologis. Pb secara tidak langsung memengaruhi kadar IGF-1 dengan mengganggu metabolisme mineral dan sistem hematopoietic yang kemungkinan berkontribusi terhadap disregulasi pensinyalan IGF-1 yang dapat menyebabkan Kesehatan yang serius karena IGF-1 merupakan faktor penting dalam proses pertumbuhan dan perkembangan, dapat disimpulkan bahwa paparan logam berat, khususnya Cd, berpotensi memengaruhi kadar IGF-1 pada anak jalanan, terutama pada kelompok fase pubertas awal. Meskipun hubungan statistik yang ditemukan tidak signifikan, arah korelasi negatif yang konsisten antara Cd dan IGF-1 menunjukkan adanya implikasi biologis yang perlu diperhatikan. Pb menunjukkan efek yang lebih lemah terhadap IGF-1, namun tetap menjadi perhatian karena potensi toksisitasnya.

Penelitian ini sejalan dengan temuan-temuan sebelumnya dimana kadar Cd dan Pb dalam darah tidak berhubungan secara signifikan dengan konsentrasi Cd dan

Pb di udara ambien. Hasil penelitian biomonitoring Eropa menunjukkan bahwa variasi kadar Cd dalam darah lebih banyak ditentukan oleh diet dan kebiasaan merokok dibandingkan dengan paparan udara (Dosoky et al., 2020). Temuan serupa juga ditunjukkan oleh studi besar di Beijing terhadap lebih dari 13.000 anak yang menemukan bahwa paparan jangka pendek $PM_{2.5}$ tidak berkorelasi signifikan dengan kadar Cd dalam darah (SEVIK, 2019), karakteristik perumahan dan status sosio-demografis merupakan prediktor dominan kadar Pb darah anak, sementara faktor udara ambien tidak signifikan (Hauptman et al., 2021). Secara biologis, hal ini dapat dijelaskan karena darah hanya menjadi media transport transien bagi logam berat; lebih dari 90% beban Pb tubuh disimpan di tulang, sementara Cd lebih banyak berakumulasi di ginjal dan hati (Malara et al., 2023). Selain itu, faktor gizi, khususnya cadangan besi (ferritin), terbukti memoderasi penyerapan Cd, dimana individu dengan status besi baik cenderung memiliki kadar Cd darah yang sangat rendah atau bahkan tidak terdeteksi (Santos-Gallego & Jialal, 2016). Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat bukti bahwa kadar Cd dan Pb dalam darah lebih mencerminkan paparan akut jangka pendek serta dipengaruhi oleh faktor biologis dan lingkungan non-udara, sehingga tidak berhubungan signifikan dengan konsentrasi Cd dan Pb di udara ambien (S. H. Kim et al., 2017).

Kekuatan dan Keterbatasan Penelitian ini merupakan salah satu yang pertama di Indonesia yang menyelidiki paparan logam berat pada anak jalanan, populasi yang sangat rentan. Pengukuran gabungan sampel udara dan biomonitoring darah memberikan penilaian paparan yang lebih komprehensif. Namun, beberapa keterbatasan penelitian ini perlu diperhatikan. Pengambilan sampel udara terbatas pada enam lokasi dan mungkin tidak mewakili variabilitas paparan jangka panjang. Biomarker darah mencerminkan paparan terkini, bukan paparan kumulatif, sehingga berpotensi meremehkan beban tubuh total. Selain itu, data asupan makanan yang terperinci, konsumsi tanah, dan faktor paparan rumah tangga tidak dikumpulkan, yang mungkin telah menimbulkan faktor pengganggu yang tidak terukur.

Temuan kami menyoroti perlunya intervensi kesehatan masyarakat yang serta strategi yang harus dilakukan meliputi pengurangan emisi terkait lalu lintas, penyediaan dukungan nutrisi untuk mengurangi kerentanan terhadap penyerapan logam berat, dan peningkatan akses layanan kesehatan bagi anak jalanan. Penelitian lebih lanjut harus menggabungkan biomarker jangka panjang (misalnya, rambut, urin, atau tulang), survei pola makan yang terperinci, dan analisis multivariat untuk lebih menjelaskan kontribusi berbagai jalur paparan.

3.5 Kesimpulan dan Saran

3.5.1 Kesimpulan

Anak jalanan di daerah dengan lalu lintas tinggi di Kota Makassar, Indonesia, secara konsisten terpapar kadmium (Cd) dan timbal (Pb), korelasi antara konsentrasi udara dan darah sangat lemah yang mencerminkan peningkatan kerentanan. Sebagian besar kadar Pb dan Cd darah berada dalam rentang aman deteksi kadar tetapi menjadi potensi risiko kesehatan akibat paparan Cd dan Pb, Cd mempengaruhi kadar IGF-1 pada anak jalanan, khususnya pada anak usia pubertas awal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai Cd dan Pb relatif rendah, sifat bioakumulatif logam berat tetap menimbulkan kekhawatiran karena dapat terakumulasi dalam jaringan dan menimbulkan gangguan kesehatan jangka panjang.

3.5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian Disarankan penerapan intervensi sederhana berupa pembatasan aktivitas anak pada area dengan kepadatan lalu lintas tinggi, terutama pada kelompok usia lebih muda yang menunjukkan kadar Cd lebih tinggi, serta peningkatan praktik kebersihan diri untuk mengurangi paparan dari debu dan permukaan terkontaminasi. Selain itu, penguatan intervensi gizi perlu dilakukan dengan memastikan kecukupan asupan protein dan mikronutrien. Pemantauan kesehatan disarankan dilakukan secara selektif pada anak dengan risiko tinggi, khususnya pada fase pubertas awal, mengingat adanya kecenderungan penurunan IGF-1 seiring peningkatan kadar Cd.

3.5.3 Output Penelitian

Luaran penelitian ini telah dipublikasikan pada jurnal internasional terindeks sebagai bentuk diseminasi ilmiah

DAFTAR PUSTAKA

- Ali el-hengary, S. B. (2023). Cadmium Toxicity: Insight into Sources, Toxicokinetics, and Effect on Vital Organs and Embryos. *Journal of Clinical Research and Reports*, 13(4), 01–10. <https://doi.org/10.31579/2690-1919/319>
- Calcaterra, V., Cena, H., Regalbuto, C., Vinci, F., Porri, D., Verduci, E., Mameli, C., & Zuccotti, G. V. (2021). The Role of Fetal, Infant, and Childhood Nutrition in the Timing of Sexual Maturation. *Nutrients*, 13(2), 419. <https://doi.org/10.3390/nu13020419>
- Capelo, R., Rohlman, D. S., Jara, R., García, T., Viñas, J., Lorca, J. A., Contreras Llanes, M., & Alguacil, J. (2022). Residence in an Area with Environmental Exposure to Heavy Metals and Neurobehavioral Performance in Children 9–11 Years Old: An Explorative Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8), 4732. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084732>
- Chandravanshi, L., Shiv, K., & Kumar, S. (2021). Developmental toxicity of cadmium in infants and children: a review. *Environmental Analysis Health and Toxicology*, 36(1), e2021003. <https://doi.org/10.5620/eaht.2021003>
- Cusick, S. E., Jaramillo, E. G., Moody, E. C., Ssemata, A. S., Bitwayi, D., Lund, T. C., & Mupere, E. (2018). Assessment of blood levels of heavy metals including lead and manganese in healthy children living in the Katanga settlement of Kampala, Uganda. *BMC Public Health*, 18(1), 717. <https://doi.org/10.1186/s12889-018-5589-0>
- Dehkhoda, F., Lee, C. M. M., Medina, J., & Brooks, A. J. (2018). The Growth Hormone Receptor: Mechanism of Receptor Activation, Cell Signaling, and Physiological Aspects. *Frontiers in Endocrinology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fendo.2018.00035>
- Falih, i. Q., tahir, n. T., & al jedda, w. A. (2020). Evaluation of vitamin d3 and zinc levels in iraqi children with growth hormone deficiency and their relation with other biochemical parameters. *Periódico Tchê Química*, 17(36), 476–490. <https://doi.org/10.52571/PTQ.v17.n36.2020.491> Periodico36 pgs 476 490.p
- Fu, Z., & Xi, S. (2020). The effects of heavy metals on human metabolism. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 30(3), 167–176. <https://doi.org/10.1080/15376516.2019.1701594>
- Flora, G., Gupta, D., & Tiwari, A. (2012). Toxicity of lead: a review with recent updates. *Interdisciplinary Toxicology*, 5(2), 47–58. <https://doi.org/10.2478/v10102-012-0009-2>
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A. (2020a). The Effects of Cadmium Toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 3782. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
- Himani, Kumar, R., Ansari, J. A., Mahdi, A. A., Sharma, D., Karunanand, B., & Datta, S. K. (2020). Blood Lead Levels in Occupationally Exposed Workers Involved in Battery Factories of Delhi-NCR Region: Effect on Vitamin D and Calcium

- Metabolism. *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 35(1), 80–87. <https://doi.org/10.1007/s12291-018-0797-z>
- Kippler, M., Bottai, M., Georgiou, V., Koutra, K., Chalkiadaki, G., Kampouri, M., Kyriklaki, A., Vafeiadi, M., Fthenou, E., Vassilaki, M., Kogevinas, M., Vahter, M., & Chatzi, L. (2016). Impact of prenatal exposure to cadmium on cognitive development at preschool age and the importance of selenium and iodine. *European Journal of Epidemiology*, 31(11), 1123–1134. <https://doi.org/10.1007/s10654-016-0151-9>
- Lemaire, J., Van der Hauwaert, C., Savary, G., Dewaeles, E., Perrais, M., Lo Guidice, J. M., Pottier, N., Glowacki, F., & Cauffiez, C. (2020). Cadmium-Induced Renal Cell Toxicity Is Associated With MicroRNA Deregulation. *International Journal of Toxicology*, 39(2), 103–114. <https://doi.org/10.1177/1091581819899039>
- Liu, C., & Park, G. (2024). The association of cadmium heavy metal with growth failure in children: A systematic review and meta-analysis. *Nutrición Hospitalaria*. <https://doi.org/10.20960/nh.04965>
- Liu, D., Shi, Q., Liu, C., Sun, Q., & Zeng, X. (2023). Effects of Endocrine-Disrupting Heavy Metals on Human Health. *Toxics*, 11(4), 322. <https://doi.org/10.3390/toxics11040322>
- Malin Igra, A., Vahter, M., Raqib, R., & Kippler, M. (2019). Early-Life Cadmium Exposure and Bone-Related Biomarkers: A Longitudinal Study in Children. *Environmental Health Perspectives*, 127(3). <https://doi.org/10.1289/EHP3655>
- Mazumdar, I., Goswami, K., & Ali, M. S. (2017). Status of Serum Calcium, Vitamin D and Parathyroid Hormone and Hematological Indices Among Lead Exposed Jewelry Workers in Dhaka, Bangladesh. *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 32(1), 110–116. <https://doi.org/10.1007/s12291-016-0582-9>
- Mexitalia, M., Pardede, B. K., Utari, A., & Mexitalia, M. (2021). Insulin-like growth factor-1 and growth in infants 0-6 months of age. *Paediatrica Indonesiana*, 61(2), 89–93. <https://doi.org/10.14238/pi61.2.2021.89-93>
- Nwobi, N. L., Nwobi, J. C., Adejumo, E. N., Usiobeigbe, O. S., Adetunji, O. A., Atulomah, N. O., & Anetor, J. I. (2021). Blood lead levels, calcium metabolism and bone-turnover among automobile technicians in Sagamu, Nigeria: Implications for elevated risk of susceptibility to bone diseases. *Toxicology and Industrial Health*, 37(11), 705–713. <https://doi.org/10.1177/07482337211048963>
- Ologundudu, F., Tobi, A., & Fopeyemi, O. (2019). Bioaccumulation potential and health risk assessment of heavy metals in *Corchorus olitorius* L. (Malvaceae) and *Amaranthus hybridus* L. (Amaranthaceae) obtained from a selected dump site in Akure, Nigeria. *Brazilian Journal of Biological Sciences*, 6(12), e375. <https://doi.org/10.21472/bjbs.061214>
- Rachmat, B., Helper, D., Parulian Manalu, S., & Elsi, E. (2020). Blood Lead Levels and their Relationship with Lead in Ambien Air in Children in the Area of used Lead-Acid Battery in Depok City, Indonesia. *Journal of Ecophysiology and Occupational Health*, 20(3 & 4), 145–154. <https://doi.org/10.18311/jeoh/2020/26134>

- Sadhu, P., Tambolkar, S., Jadhav, D., & Daru, A. (2024). Chronic Lead Toxicity in a Family: A Case Report. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.66574>
- Samadhi, L. F. M., . I., & Mukono, I. S. (2022). Systematic Review-Meta Analysis Study the Effect of Cadmium and Copper Exposure on Children's Cognitive. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, 21(4). <https://doi.org/10.12982/CMUJNS.2022.066>
- Sang, Z., Zhang, H., Ma, W., Dong, Y., & Shi, B. (2022). Parathyroid hormones in relation to serum cadmium and lead: the NHANES 2003–2006. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(7), 18491–18498. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23530-7>
- Satarug, S., C. Gobe, G., A. Vesey, D., & Phelps, K. R. (2020). Cadmium and Lead Exposure, Nephrotoxicity, and Mortality. *Toxics*, 8(4), 86. <https://doi.org/10.3390/toxics8040086>
- Shezi, B., Jafta, N., & Naidoo, R. N. (2024). Potential Health Risks of Indoor Particulate Matter Heavy Metals in Resource-Constrained Settings of South Africa. *Atmosphere*, 15(8), 911. <https://doi.org/10.3390/atmos15080911>
- Shin, M. W., Kim, H.-B., Kwon, A., Park, M. J., & Kim, S.-H. (2024). Associations between Urinary Mercury/Cadmium Concentrations and Anthropometric Features in Korean Children. *Toxics*, 12(3), 175. <https://doi.org/10.3390/toxics12030175>
- Switkowski, K. M., Jacques, P. F., Must, A., Hivert, M.-F., Fleisch, A., Gillman, M. W., Rifas-Shiman, S., & Oken, E. (2017). Higher Maternal Protein Intake during Pregnancy Is Associated with Lower Cord Blood Concentrations of Insulin-like Growth Factor (IGF)-II, IGF Binding Protein 3, and Insulin, but Not IGF-I, in a Cohort of Women with High Protein Intake. *The Journal of Nutrition*, 147(7), 1392–1400. <https://doi.org/10.3945/jn.117.250589>
- Tessema, M., Gunaratna, N. S., Brouwer, I. D., Donato, K., Cohen, J. L., McConnell, M., Belachew, T., Belayneh, D., & De Groote, H. (2018a). Associations among High-Quality Protein and Energy Intake, Serum Transthyretin, Serum Amino Acids and Linear Growth of Children in Ethiopia. *Nutrients*, 10(11), 1776. <https://doi.org/10.3390/nu10111776>
- Tessema, M., Gunaratna, N. S., Brouwer, I. D., Donato, K., Cohen, J. L., McConnell, M., Belachew, T., Belayneh, D., & De Groote, H. (2018b). Associations among High-Quality Protein and Energy Intake, Serum Transthyretin, Serum Amino Acids and Linear Growth of Children in Ethiopia. *Nutrients*, 10(11), 1776. <https://doi.org/10.3390/nu10111776>
- Witkowska, D., Słowik, J., & Chilicka, K. (2021). Heavy Metals and Human Health: Possible Exposure Pathways and the Competition for Protein Binding Sites. *Molecules*, 26(19), 6060. <https://doi.org/10.3390/molecules26196060>
- Xu, Y., Liu, M.-C., Wang, P., Xu, B., Liu, X.-Q., Zhang, Z.-P., Ren, L.-F., Qin, Q., Ma, Y.-Y., Luo, W.-J., & Hao, X.-K. (2014). Correlation between serum IGF-1 and blood lead level in short stature children and adolescent with growth hormone

- deficiency. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 7(4), 856–864.
- Yao, Q., Zhou, G., Xu, M., Dai, J., Qian, Z., Cai, Z., Zhang, L., Tan, Y., & Hu, R. (2019). Blood metal levels and serum testosterone concentrations in male and female children and adolescents: NHANES 2011–2012. *PLOS ONE*, 14(11), e0224892. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224892>
- Zhang, H., Wang, J., Zhang, K., Shi, J., Gao, Y., Zheng, J., He, J., Zhang, J., Song, Y., Zhang, R., Shi, X., Jin, L., & Li, H. (2024). Association between heavy metals exposure and persistent infections: the mediating role of immune function. *Frontiers in Public Health*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1367644>

BAB IV TOPIK PENELITIAN III

SIMULASI PROBABILISTIK DAN SENSITIVITAS RISIKO KESEHATAN AKIBAT PAPARAN KADMIUM DAN TIMBAL PADA ANAK JALANAN

4.1 Abstrak

Pendahuluan: Paparan logam berat kadmium (Cd) dan timbal (Pb) merupakan permasalahan kesehatan lingkungan yang signifikan, terutama pada kelompok rentan seperti anak jalanan yang beraktivitas di kawasan perkotaan padat transportasi. Kedua logam tersebut bersifat toksik, persisten, dan berpotensi menimbulkan dampak kesehatan jangka panjang. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi risiko kesehatan non-karsinogenik akibat paparan Cd dan Pb pada anak jalanan di Kota Makassar menggunakan pendekatan probabilistik. **Metode:** Penelitian dilakukan pada enam titik pengukuran udara ambien di lima kecamatan dengan kepadatan transportasi tinggi, dengan subjek anak jalanan berusia 3–12 tahun. Estimasi risiko kesehatan dilakukan melalui Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan berbasis *Monte Carlo Simulation* (MCS) menggunakan ribuan iterasi untuk merepresentasikan ketidakpastian dan variabilitas parameter input, meliputi konsentrasi logam berat di udara, frekuensi dan durasi paparan, laju inhalasi, serta faktor fisiologis individu. **Hasil:** Output simulasi menunjukkan bahwa nilai median Hazard Quotient (HQ) untuk Cd sebesar 7, dengan rentang persentil P5–P95 masing-masing 4–11, yang secara konsisten berada di atas ambang batas aman ($HQ \leq 1$). Seluruh distribusi probabilistik HQ Cd berada pada kondisi tidak aman, tanpa skenario pajanan berisiko rendah. Sementara itu, Pb menunjukkan nilai median HQ sebesar 2 (P5 = 1; P95 = 4), dengan sekitar 95% hasil iterasi berada di atas ambang aman. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa variasi HQ Cd didominasi oleh parameter perilaku individu, terutama frekuensi dan durasi paparan, sedangkan variasi HQ Pb terutama dipengaruhi oleh konsentrasi logam di udara ambien. **Pembahasan/Kesimpulan:** Hasil penelitian mengonfirmasi adanya risiko kesehatan non-karsinogenik yang bermakna akibat paparan Cd dan Pb pada anak jalanan, dengan determinan risiko yang berbeda antar logam. Oleh karena itu, strategi mitigasi perlu diarahkan secara spesifik, melalui pengendalian paparan berbasis perilaku untuk Cd dan pengendalian kualitas udara perkotaan untuk Pb, guna meminimalkan dampak kesehatan jangka panjang pada kelompok rentan.

Kata kunci: anak jalanan, logam berat, kadmium, timbal, Monte Carlo Simulation, risiko Kesehatan

4.2 Pendahuluan

Logam berat seperti timbal (Pb) dan kadmium (Cd) merupakan kontaminan lingkungan yang bersifat toksik dan persisten, sehingga menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan, terutama pada kelompok rentan seperti anak-anak. Anak jalanan termasuk populasi yang paling terpapar karena keseharian mereka berlangsung di area dengan kepadatan lalu lintas yang tinggi, sanitasi yang buruk, serta kedekatan dengan sumber polutan. Kondisi ini memperbesar peluang

masuknya logam berat ke dalam tubuh melalui udara, tanah, maupun debu jalanan. Di kota-kota besar seperti Makassar, emisi dari kendaraan bermotor dan pembakaran bahan bakar merupakan sumber utama pencemar, yang mengakibatkan akumulasi Pb dan Cd dalam lingkungan perkotaan pada kadar yang mengkhawatirkan (Satarug et al., 2020).

Paparan timbal diketahui menimbulkan dampak serius terhadap kesehatan anak, termasuk penurunan fungsi kognitif, penurunan IQ, dan gangguan neurologis (C. Huang et al., 2022). Sementara itu, kadmium memiliki sifat nefrotoksik dan karsinogenik, serta berpotensi mengganggu sistem imun dan pertumbuhan (Y. M. Hsueh et al., 2017). Data mengenai konsentrasi logam berat tersebut pada anak jalanan masih terbatas, sehingga sulit diperoleh gambaran yang akurat mengenai risiko paparan jangka panjang (Cumber & Tsoka-Gwegweni, 2015a). Untuk memahami risiko kesehatan yang ditimbulkan, diperlukan suatu pendekatan ilmiah yang tidak hanya menilai tingkat paparan, tetapi juga memperhitungkan ketidakpastian (uncertainty) dan variabilitas (variability) dari data yang tersedia (Mallongi et al., 2017b).

Simulasi probabilistik seperti Monte Carlo Simulation (MCS) memiliki keunggulan dibandingkan pendekatan deterministik. Metode deterministik hanya memberikan estimasi tunggal (point estimate), yang sering kali tidak mampu mencerminkan kondisi riil di lapangan. Sebaliknya, MCS memungkinkan perhitungan berulang hingga ribuan bahkan jutaan kali dengan menggunakan distribusi probabilitas dari setiap parameter masukan, seperti konsentrasi logam berat, frekuensi inhalasi, durasi paparan, dan karakteristik fisiologis anak (Wang et al., 2023).

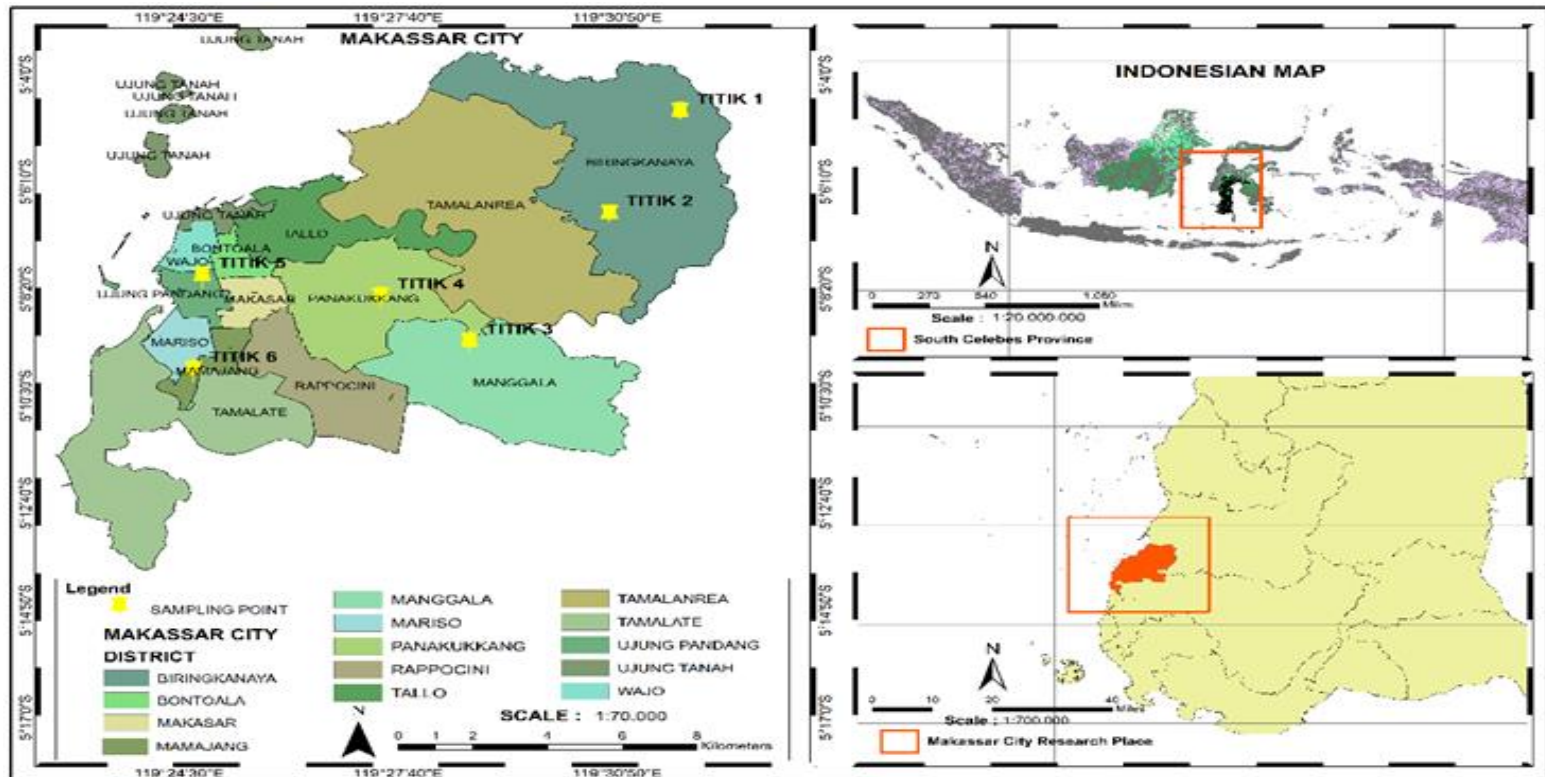
Keunggulan utama MCS adalah kemampuannya menyajikan distribusi penuh dari hasil risiko, bukan sekadar nilai rata-rata atau batas maksimum. Dengan demikian, penilaian risiko menjadi lebih komprehensif karena mencakup rentang variasi paparan yang mungkin dialami oleh anak jalanan. Selain itu, MCS dapat dikombinasikan dengan analisis sensitivitas untuk mengidentifikasi faktor yang paling berkontribusi terhadap tingkat risiko. Informasi ini sangat penting karena dapat digunakan untuk menyusun strategi mitigasi yang lebih tepat sasaran, misalnya menentukan apakah intervensi perlu difokuskan pada pengendalian kualitas udara, pengelolaan debu jalan, atau faktor perilaku individu (Abou Jaoudé, 2022).

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penerapan MCS dalam penilaian risiko kesehatan lingkungan mampu meningkatkan akurasi estimasi, memperkuat validitas hasil, serta memberikan dasar yang lebih kuat bagi pengambilan keputusan berbasis bukti (Mallongi et al., 2021). Oleh karena itu, penerapan simulasi probabilistik berbasis MCS dalam menilai risiko kesehatan akibat paparan kadmium dan timbal pada anak jalanan menjadi sangat relevan.

Dengan demikian, penelitian ini penting dilakukan untuk memperoleh gambaran yang lebih realistis dan komprehensif mengenai risiko kesehatan, non-karsinogenik, pada anak jalanan. Hasil kajian diharapkan dapat mendukung penyusunan kebijakan kesehatan lingkungan yang lebih responsif, adaptif, dan berorientasi pada perlindungan kelompok rentan.

4.3 Metode Penelitian

4.3.1. Lokasi dan Waktu Penelitian



Gambar 4 1 Peta Titik Pengambilan Sampel udara Ambien daerah Padat Transportasi Kota Makassar

Keterangan Lokasi Pengambilan Sampel udara Ambien

1. Titik 1 : Sudiang (Kecamatan Biringkanaya)
2. Titik 2 : Daya (Kecamatan Biringkanaya)
3. Titik 3 : Antang (Kecamatan Manggala)
4. Titik 4 : Panaikang (Kecamatan Panakkukang)
5. Titik 5 : Sudirman (Kecamatan Ujung Pandang)
6. Titik 6 : Cendrawasih (Kecamatan Mamajang)

Area Studi, Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran ilmiah mengenai tingkat paparan yang dialami oleh anak jalanan, sekaligus menjadi dasar bagi pemerintah dalam merancang strategi mitigasi untuk melindungi kelompok rentan tersebut. Berdasarkan Gambar 1, lokasi pengambilan sampel udara ambien dilakukan di lima kecamatan di Kota Makassar, dengan enam titik pengukuran, yaitu: titik 1 di wilayah Sudiang, titik 2 di wilayah Daya, titik 3 di wilayah Antang, titik 4 di wilayah Panaikang, titik 5 di wilayah Sudirman, dan titik 6 di wilayah Cendrawasih.

4.3.2 Desain/Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode Simulasi Monte Carlo (MCS) untuk memperkirakan risiko kesehatan non-karsinogenik dan karsinogenik akibat paparan logam berat. MCS memiliki keunggulan dimana dapat menangkap ketidakpastian dan variabilitas dalam data serta memberikan hasil berbasis probabilitas yang lebih akurat. Dengan menggunakan metode persamaan model meta-analitik, simulasi Monte Carlo (MCS) berfungsi untuk menentukan kemungkinan bahaya atau risiko yang dapat memengaruhi kesehatan penduduk di suatu wilayah.

Simulasi Monte Carlo adalah teknik simulasi yang menggunakan pengambilan sampel acak untuk memecahkan masalah kuantitatif yang melibatkan ketidakpastian atau variabilitas. Teknik ini memungkinkan analisis risiko potensial yang lebih mendalam. Dengan penerapan metode ini mampu mengevaluasi dampak variabel yang tidak pasti dan mengidentifikasi berbagai kemungkinan hasil, yang sangat penting dalam pengambilan keputusan berbasis data. Simulasi Monte Carlo secara efektif menggunakan perangkat lunak atau aplikasi yang dapat membantu proses simulasi yang menghasilkan variabel acak dan mengulang proses simulasi melalui beberapa literasi. Dalam studi ini, perangkat lunak Oracle Crystal Ball versi 11.1.2 digunakan sebagai add-in di Microsoft Excel 2018, yang memungkinkan perhitungan statistik dan probabilitas secara otomatis.

4.3.3 Teknik Pengambilan sampel

Sampe sampel lingkungan dilakukan pada kawasan padat transportasi di Kota Makassar, dengan pengukuran udara ambien berjarak 20 meter dari sumber emisi. Titik lokasi ditentukan berdasarkan data sekunder dari Satuan Lalu Lintas Polrestabes Makassar, dengan mempertimbangkan faktor meteorologi (arah dan kecepatan angin), tata guna lahan, dan tingkat kepadatan lalu lintas. Sebanyak enam titik pengambilan sampel dipilih di lima kecamatan, yaitu: Sudiang, Daya, Antang, Panaikang, Sudirman, dan Cendrawasih. Sampel subjek adalah anak jalanan yang beraktivitas di kawasan padat transportasi dengan kriteria inklusi: berusia di bawah

18 tahun dan secara rutin berada di jalan untuk bekerja, beraktivitas, atau tinggal selama minimal lima tahun terakhir. Anak dengan gangguan perkembangan mental dan anak yang tidak bersedia berpartisipasi dikecualikan dari penelitian ini.

4.3.4 Analisis Data

Simulasi Monte Carlo merupakan salah satu teknik kuantitatif untuk evaluasi dan analisis risiko yang mengandalkan nilai acak dan proses iteratif. Dalam penerapannya, nilai acak dibangkitkan dari berbagai variabel yang diuji kemudian diulang dalam serangkaian iterasi untuk membangun distribusi hasil yang akurat. Teknik ini dapat digunakan untuk variabel yang sederhana maupun yang sangat kompleks, berfungsi untuk mengantisipasi berbagai kejadian acak yang menjadi sumber risiko. Simulasi ini digunakan untuk mengatasi variabilitas dan ketidakpastian dalam analisis risiko kesehatan. Dengan perangkat lunak khusus, simulasi Monte Carlo dijalankan untuk menghasilkan distribusi probabilitas risiko kesehatan yang dihadapi oleh masyarakat dan lingkungan sekitar tambang. Berikut ini adalah langkah-langkah yang dapat dilakukan untuk menerapkan teknik Simulasi Monte Carlo. Simulasi Monte Carlo merupakan salah satu teknik kuantitatif untuk evaluasi dan analisis risiko yang mengandalkan nilai acak dan proses iteratif. Dalam penerapannya, nilai acak dibangkitkan dari berbagai variabel yang diuji kemudian diulang dalam serangkaian literasi untuk membangun distribusi hasil yang akurat. Teknik ini dapat digunakan untuk variabel sederhana maupun sangat kompleks, berfungsi untuk mengantisipasi berbagai kejadian acak yang menjadi sumber risiko]. Simulasi ini digunakan untuk mengatasi variabilitas dan ketidakpastian dalam analisis risiko kesehatan. Dengan perangkat lunak khusus, simulasi Monte Carlo dijalankan untuk menghasilkan distribusi probabilitas risiko kesehatan yang dihadapi oleh masyarakat dan lingkungan sekitar tambang. Berikut ini adalah langkah-langkah yang dapat dilakukan

4.4 Hasil dan pembahasan

4.4.1 Hasil Penelitian

Estimasi risiko yang akurat memerlukan analisis multivariabel, yang mencakup berbagai faktor seperti tingkat konsentrasi pencemar, durasi eksposur, berat badan individu, dan karakteristik populasi. Analisis multivariabel memungkinkan integrasi berbagai faktor risiko untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai dampak kesehatan. Pendekatan tradisional yang sering digunakan, seperti metode deterministik, memiliki keterbatasan karena hanya memberikan hasil rata-rata dan tidak mempertimbangkan variabilitas serta ketidakpastian dalam data (Flinders et al., 2025). Sebaliknya, metode Monte Carlo Simulation menjadi solusi yang lebih unggul karena mampu menganalisis distribusi probabilitas dari variabel-variabel risiko, memberikan hasil yang lebih realistis dan dapat diandalkan (Abou Jaoudé, 2022).

Monte Carlo Simulation bekerja dengan mensimulasikan berbagai skenario secara acak untuk menghasilkan distribusi kemungkinan hasil. Dalam konteks penelitian ini, MCS digunakan untuk mengestimasi risiko kesehatan akibat paparan kadmium dan timbal pada anak jalanan di daerah padat transportasi. Setiap variabel ini memiliki distribusi probabilitas tersendiri yang mencerminkan ketidakpastian pada

data input. Melalui ribuan iterasi simulasi, MCS dapat memberikan distribusi risiko yang mencakup skenario terburuk hingga terbaik, sehingga hasilnya lebih mendekati kondisi nyata (Jafarzadeh et al., 2022a)

Dalam konteks pengelolaan risiko, penggunaan MCS tidak hanya membantu mengidentifikasi tingkat risiko tetapi juga menyediakan informasi yang esensial untuk merancang strategi mitigasi. Sebagai metode statistik yang menganalisis sistem dengan ketidakpastian tinggi, MCS menjadi alat penting dalam bidang kesehatan lingkungan. Prosesnya melibatkan definisi variabel input yang tidak pasti, menetapkan distribusi probabilitas untuk setiap variabel, dan menjalankan simulasi acak berulang kali.

Penelitian ini menggunakan metode Monte Carlo Simulation (MCS) untuk mengestimasi risiko kesehatan non-karsinogenik akibat paparan cadmium dan timbal. Menggunakan metode persamaan model matematika, Simulasi Monte Carlo (MCS) dimana berfungsi untuk menentukan kemungkinan bahaya atau risiko yang dapat memengaruhi kesehatan populasi dalam suatu area. Namun, di masa lalu, satu-satunya cara untuk menilai risiko kesehatan terhadap populasi dari paparan bahan kimia adalah dengan menghitung data yang tersedia secara manual, yang terkadang hanya menghasilkan satu titik risiko dan mungkin memiliki hasil yang ambigu sehingga MCS di rasa mampu dalam menghitung kemungkinan risiko secara lebih akurat.

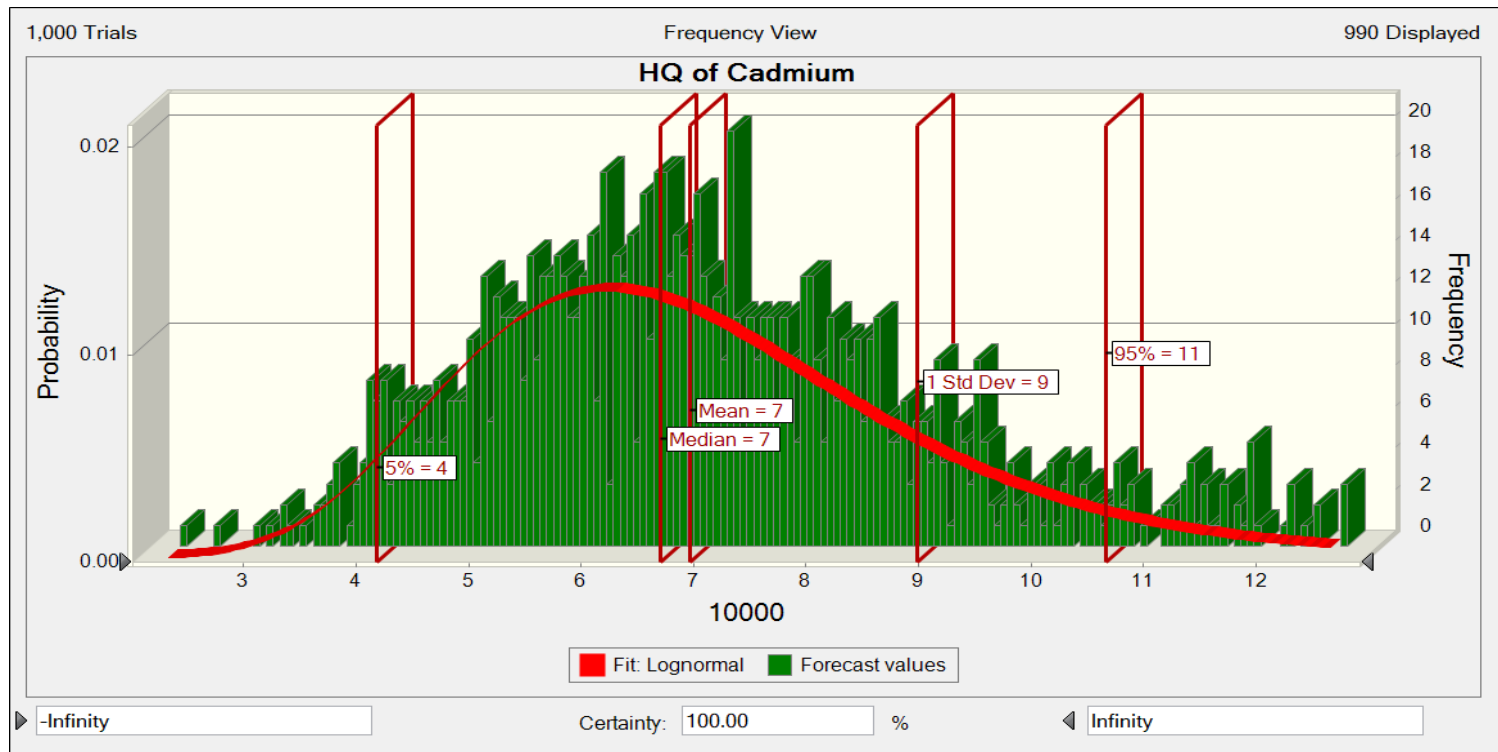
MCS memungkinkan identifikasi semua elemen ketidakpastian dari input yang terhubung dengan estimasi risiko dalam hasil perhitungan, yang kemudian dikaitkan sebagai distribusi probabilitas untuk memprediksi risiko atau paparan secara akurat. Pada penelitian ini, desain Simulasi Monte Carlo dilakukan untuk memperkirakan risiko Kesehatan yang terjadi pada anak jalana akibat paparan cadmium dan timbal di daerah padat transportasi. Menganalisis distribusi variabel kunci mengungkapkan kemungkinan risiko kesehatan manusia. Jika HQ menunjukkan batas paparan aman untuk Cd dan Pb, distribusi kumulatif dinyatakan dalam persentil ke-5 dan ke-95. Selain itu, tes sensitivitas dilakukan dengan menggunakan Persamaan. Hal ini sejalan dengan temuan Mallongi et al. (2022), yang menerapkan MCS dan analisis sensitivitas untuk meningkatkan akurasi estimasi risiko kesehatan akibat paparan elemen toksik dalam air tanah di kawasan karst Maros (Mallongi et al., 2022).

Tabel 5.1. Rerata Risiko Non-Karsinogenik *Hazard Quotient (HQ)* dari Hasil *Environmental Health Risk Assessment (EHRA)* Anak di Daerah Padat Transportasi di Kota Makassar.

Parameter	HQ (Anak)
Kadmium (Cd)	0.09
Timbal (Pb)	72,46

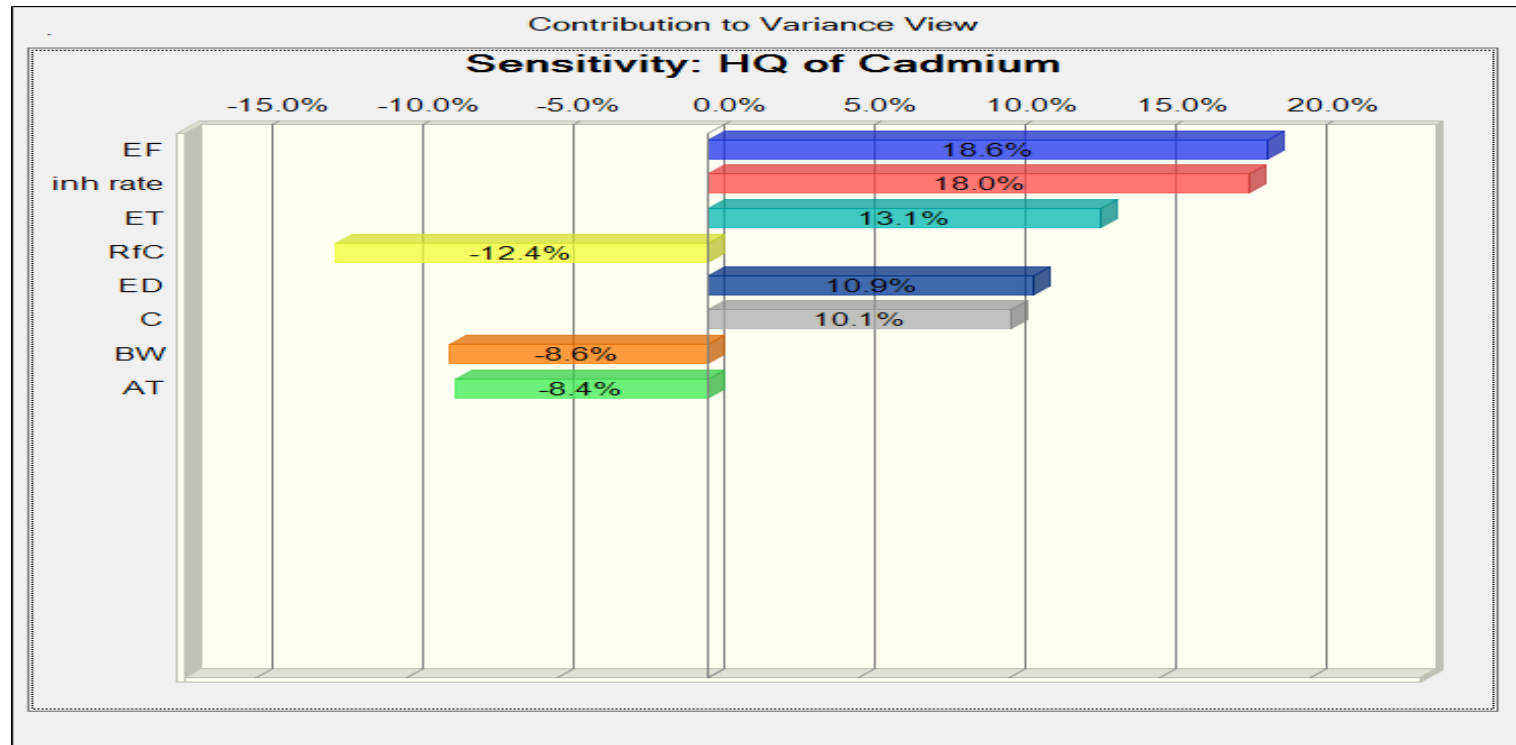
Sumber : Data primer (2024)

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 5.1, rerata nilai Hazard Quotient (HQ) non-karsinogenik untuk paparan kadmium (Cd) pada anak di daerah padat transportasi Kota Makassar diperoleh sebesar $9,30 \times 10^{-2}$. Nilai ini berada jauh di bawah ambang batas 1, yang berarti risiko non-karsinogenik akibat paparan kadmium relatif rendah dan belum menunjukkan potensi efek kesehatan yang signifikan. Meskipun demikian, paparan kadmium tetap perlu diwaspadai karena sifatnya yang akumulatif dalam tubuh, sehingga dapat meningkatkan potensi risiko kesehatan apabila terjadi paparan jangka panjang. Sebaliknya, nilai HQ timbal (Pb) tercatat sebesar $7,25 \times 10^1$ atau 72,5, yang jauh melampaui nilai ambang batas 1.



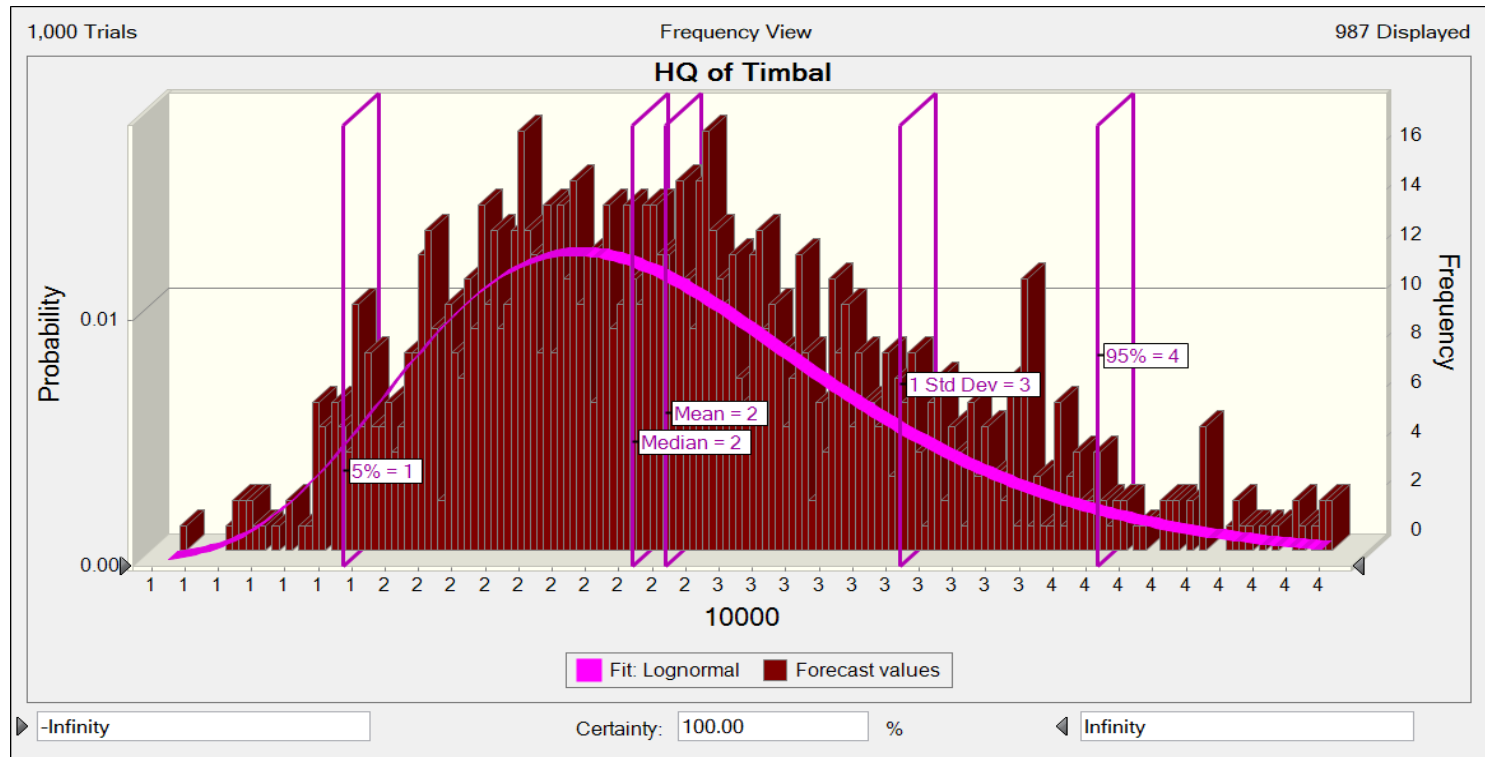
Gambar 4 2 Probabilitas Risiko kadmium pada anak (Sumber : Data primer, 2024)

Hasil pemodelan probabilistik menggunakan metode Monte Carlo dengan 1.000 iterasi menunjukkan bahwa distribusi *Hazard Quotient* (HQ) untuk paparan Cadmium mengikuti sebaran lognormal dengan nilai rata-rata sebesar 7, median 7, dan simpangan baku sekitar 9. Analisis persentil memperlihatkan bahwa nilai HQ pada persentil ke-5 adalah 4, sedangkan persentil ke-95 mencapai 11. Hal ini menunjukkan bahwa hampir seluruh simulasi menghasilkan HQ jauh di atas nilai ambang non-karsinogenik ($HQ = 1$) yang secara umum dijadikan titik acuan keamanan. Dengan demikian, probabilitas paparan Cadmium yang melebihi tingkat aman dapat dikatakan mendekati 100%, yang berarti terdapat potensi risiko kesehatan non-kanker yang sangat tinggi pada populasi yang terpapar. Temuan ini menegaskan bahwa paparan Cadmium pada anak jalanan di daerah padat transportasi yang dimodelkan berada dalam kategori yang patut diwaspadai secara serius, sehingga langkah mitigasi dan pengendalian paparan mutlak diperlukan,



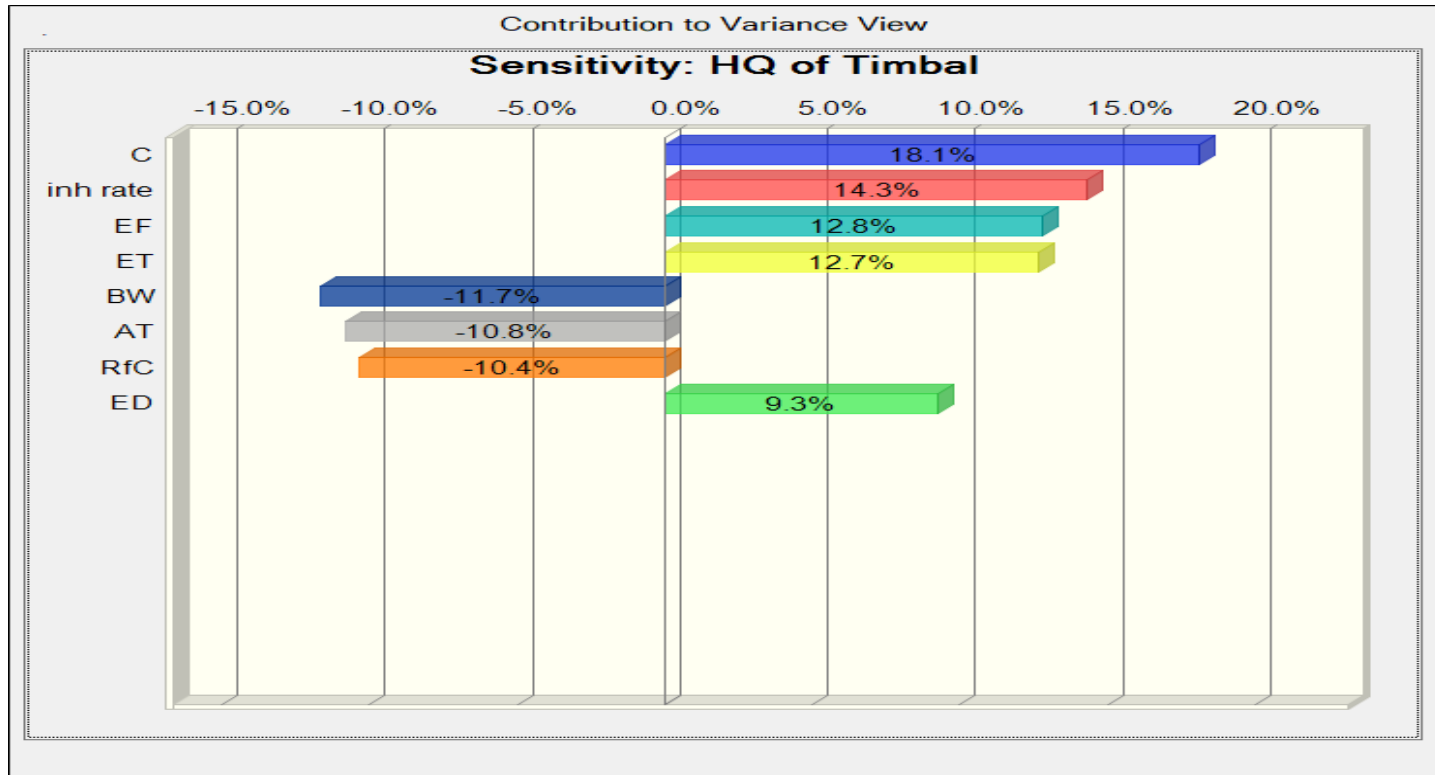
Gambar 4 3 Sensitivity HQ Cadmium pada anak jalanan (Sumber; Data primer 2024)

Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa variabilitas *Hazard Quotient* (HQ) cadmium terutama dipengaruhi oleh faktor paparan, yaitu *exposure frequency* (EF), *inhalation rate* (laju inhalasi), dan *exposure time* (ET), dengan kontribusi masing-masing sebesar 18,6%, 18,0%, dan 13,1%. Ketiga faktor ini berperan dominan karena semakin sering, semakin besar volume udara yang dihirup, serta semakin lama durasi paparan, maka dosis cadmium yang masuk ke dalam tubuh juga meningkat secara signifikan sehingga nilai HQ cenderung lebih tinggi. Selain itu, variabel *exposure duration* (ED) dan konsentrasi cadmium di udara (C) turut memberikan pengaruh yang bermakna, masing-masing sebesar 10,9% dan 10,1%. Sebaliknya, beberapa faktor menunjukkan kontribusi negatif terhadap HQ. Nilai *reference concentration* (RfC) berperan sebesar -12,4%, yang berarti semakin tinggi batas acuan konsentrasi yang ditetapkan, semakin rendah nilai HQ yang dihasilkan. Faktor fisiologis seperti berat badan (BW) memberikan kontribusi sebesar -8,6%, di mana individu dengan massa tubuh lebih besar relatif memiliki dosis efektif lebih rendah per kilogram berat badan. Demikian pula, *averaging time* (AT) dengan kontribusi -8,4% menunjukkan bahwa paparan yang dirata-ratakan dalam periode waktu lebih panjang cenderung menurunkan nilai HQ. Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa risiko kesehatan akibat cadmium sangat dipengaruhi oleh parameter paparan langsung, sedangkan faktor fisiologis individu dan standar acuan berperan sebagai faktor penyeimbang yang dapat memperlemah dampak risiko.



Gambar 4 4 Probabilitas Risiko Timbal pada anak (Sumber : Data primer,2024)

Hasil analisis probabilistik menggunakan metode Monte Carlo dengan 1.000 iterasi menunjukkan bahwa distribusi *Hazard Quotient* (HQ) untuk paparan Timbal mengikuti pola lognormal dengan karakteristik nilai rata-rata sebesar 2, median 2, dan simpangan baku sekitar 3. Analisis persentil memperlihatkan bahwa nilai HQ pada persentil ke-5 berada pada angka 1, sedangkan persentil ke-95 mencapai 4. Temuan ini mengindikasikan bahwa lebih dari setengah populasi model memiliki HQ di atas 2, dan bahkan 95% hasil simulasi masih menunjukkan HQ yang melampaui nilai ambang non-karsinogenik ($HQ = 1$) yang digunakan sebagai titik acuan keamanan. Dengan demikian, probabilitas paparan Timbal yang melebihi tingkat aman dapat dikatakan sangat tinggi, yang menandakan adanya potensi risiko kesehatan non-kanker yang signifikan pada populasi yang terpapar. Oleh karena itu, hasil ini menegaskan pentingnya upaya pengendalian paparan lingkungan terhadap Timbal, terutama pada kelompok rentan, guna menurunkan potensi dampak merugikan terhadap kesehatan masyarakat.



Gambar 4 5 Sensitivity HQ Timbal pada anak jalanan

Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa variabilitas *Hazard Quotient* (HQ) timbal paling dipengaruhi oleh faktor konsentrasi timbal di udara dengan kontribusi sebesar 18,1%. Hal ini menegaskan bahwa semakin tinggi konsentrasi timbal, maka risiko kesehatan akan meningkat secara signifikan. Faktor penting berikutnya adalah laju inhalasi (14,3%), frekuensi paparan (12,8%), dan lama waktu paparan (12,7%), yang secara keseluruhan mencerminkan bahwa semakin sering, semakin banyak, dan semakin lama seseorang terpapar timbal, maka semakin tinggi pula nilai HQ yang dihasilkan. Selain itu, durasi paparan dalam tahun (9,3%) juga memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan risiko. Sebaliknya, beberapa variabel berperan menurunkan nilai HQ, yaitu berat badan (−11,7%), waktu rata-rata paparan (−10,8%), dan nilai batas aman atau *reference concentration* (−10,4%). Berat badan yang lebih besar akan menurunkan dosis efektif per kilogram tubuh, sedangkan waktu rata-rata paparan yang lebih panjang serta nilai acuan regulasi yang lebih tinggi cenderung mengurangi besarnya HQ. Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan bahwa faktor lingkungan seperti konsentrasi timbal dan pola paparan merupakan determinan utama dalam peningkatan risiko, sementara faktor fisiologis dan acuan standar berfungsi sebagai penyeimbang yang dapat memperkecil dampak risiko kesehatan.

5.4.2. Pembahasan

Pendekatan deterministik yang menghasilkan HQ cadmium (Cd) sebesar $9,30 \times 10^{-2}$ (di bawah ambang aman $HQ \leq 1$) dan HQ timbal (Pb) sebesar $7,25 \times 10^1$ (sangat melampaui ambang aman) memberikan gambaran awal mengenai potensi risiko non-karsinogenik pada anak jalanan di Makassar. Namun, penerapan pendekatan Monte Carlo Simulation (MCS) mengubah narasi ini secara radikal: HQ median Cd mencapai 7 ($P5 = 4$; $P95 = 11$), dan HQ median Pb mencapai 2 ($P5 = 1$; $P95 = 4$), menunjukkan probabilitas $HQ > 1$ hampir sebesar 100 % untuk Cd dan sekitar 95 % untuk Pb. Perbedaan signifikan ini menyoroti keterbatasan pendekatan deterministik yang hanya menggunakan nilai rata-rata, dibandingkan MCS yang mampu mencakup distribusi penuh risiko melalui pertimbangan variabilitas dan ketidakpastian parameter input—sesuai temuan bahwa pendekatan probabilistik seperti MCS meningkatkan akurasi dan keandalan dalam penilaian risiko kesehatan akibat kontaminan logam berat (Jafarzadeh et al., 2022a).

Secara toksikologis, paparan Cd jelas menunjukkan risiko yang lebih ekstrem secara kuantitatif. Sebagai logam berat yang bioakumulatif, Cd cenderung mengendap di ginjal dan paru-paru serta berpotensi menimbulkan gangguan fungsi ginjal, kerusakan jaringan paru, bahkan risiko kanker dalam jangka panjang. Fakta bahwa skenario optimis ($P5 = 4$) masih jauh melebihi ambang aman menandakan bahwa tidak ada skenario paparan cadmium yang benar-benar aman bagi anak-anak (Shafie & Ashour, 2025). Di sisi lain, timbal (Pb), sekalipun secara median HQ-nya lebih rendah, memiliki bobot toksikologis yang sangat besar bagi anak-anak karena sifat neurotoksikannya dapat mengganggu perkembangan sistem saraf pusat, menurunkan IQ, dan memicu gangguan perilaku yang kronis serta irreversibel (Su et al., 2025).

Analisis sensitivitas lebih lanjut memperjelas sifat risiko dari kedua logam. Variabilitas HQ Cd didominasi oleh faktor perilaku individu seperti frekuensi paparan (18,6 %), laju inhalasi (18 %), dan durasi paparan harian (13,1 %), menunjukkan bahwa risiko cadmium bersifat *behavior-driven* bergantung pada aktivitas anak jalanan yang intens di sepanjang jalan raya. Sebaliknya, variabilitas HQ Pb lebih dipengaruhi oleh faktor lingkungan yaitu konsentrasi di udara (18,1 %), serta laju inhalasi dan frekuensi paparan, menandakan sifat *environment-driven* dari risiko timbal. Interpretasi ini sejalan dengan penerapan MCS pada risiko kesehatan anak akibat kontaminan lingkungan, yang sering menunjukkan dominasi faktor konsentrasi lingkungan sebagai determinan risiko (Jafarzadeh et al., 2022b).

Implikasi kebijakan dari temuan ini harus bersifat ganda dan terbagi berdasarkan sifat risiko yang berbeda:

- Mitigasi risiko Cd harus berfokus pada individu, seperti edukasi perilaku, penyediaan masker, pengurangan waktu paparan di area lalu lintas, serta intervensi nutrisi (contohnya suplementasi kalsium, zat besi, dan zinc) yang terbukti menurunkan penyerapan logam berat. Pemeriksaan kesehatan rutin—terutama fungsi ginjal dan paru—merupakan langkah preventif penting.
- Mitigasi risiko Pb harus diarahkan pada kebijakan lingkungan, antara lain pengendalian emisi kendaraan bermotor, penetapan zona rendah emisi, transisi ke bahan bakar bebas timbal, serta sistem pemantauan kualitas udara secara kontinu—langkah-langkah ini penting dalam pengurangan paparan lingkungan (Wróblewski et al., 2025).

Indikator keberhasilan kebijakan dapat dinilai lewat penurunan nilai median HQ (representasi risiko tipikal), penurunan P95 (proteksi terhadap skenario ekstrem), dan khusus untuk Cd, tercapainya $P5 \leq 1$ sebagai indikasi munculnya skenario aman. Hasil penelitian ini secara keseluruhan menegaskan bahwa pendekatan deterministik tidak memadai untuk menilai risiko kesehatan anak jalanan akibat paparan logam berat—karena gagal menangkap ketidakpastian dan variabilitas nyata. Sebaliknya, MCS terbukti unggul dalam menghasilkan distribusi risiko yang lebih realistis serta mengidentifikasi faktor dominan paparan, memberikan dasar kuat untuk rekomendasi kebijakan dan intervensi berbasis bukti. Temuan ini juga menegaskan bahwa karakteristik risiko logam berat tidak dapat digeneralisasi—Cd dan Pb dipengaruhi oleh mekanisme paparan serta sifat toksikologi yang berbeda—menambah kontribusi literatur MCS saat ini (H. Huang et al., 2024; Shetty et al., 2024).

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang patut dicatat. Pertama, data konsentrasi logam berat berasal dari titik-titik pengukuran terbatas yang mungkin tidak sepenuhnya mewakili variasi spasial di wilayah kota Makassar. Kedua, hasil MCS sangat dipengaruhi oleh asumsi tentang distribusi distribusi parameter input; jika asumsi ini kurang tepat, estimasi risiko dapat bias. Ketiga, analisis saat ini hanya mempertimbangkan jalur inhalasi, sedangkan anak jalanan juga rentan terhadap paparan melalui konsumsi makanan/minuman (ingestion) dan kontak kulit (dermal), yang belum diperhitungkan. Keempat,

variabilitas biologis individu—seperti status gizi, kondisi kesehatan awal, dan faktor genetik—belum dimasukkan dalam model, padahal hal-hal ini memengaruhi sensitivitas terhadap paparan logam berat secara signifikan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan yang mencakup cakupan data lebih luas, multi-pathway exposure, dan variabilitas individu sangat diperlukan untuk memperkuat validitas temuan dan menyusun kebijakan kesehatan masyarakat yang lebih tepat sasaran.

4.5 Kesimpulan & Saran

4.5.1. Kesimpulan

Anak jalanan di kawasan padat transportasi Kota Makassar menghadapi risiko kesehatan yang signifikan akibat paparan logam berat kadmium (Cd) dan timbal (Pb). Hasil simulasi probabilistik Monte Carlo memperlihatkan bahwa nilai Hazard Quotient (HQ) untuk Cd berada jauh di atas ambang aman dengan median 7, P5 sebesar 4, dan P95 sebesar 11. Hal ini berarti bahwa bahkan dalam skenario paling optimis, seluruh paparan Cd tetap berisiko. Sementara itu, HQ untuk Pb memiliki median 2, dengan P5 sebesar 1 dan P95 sebesar 4. Meskipun relatif lebih rendah dibandingkan Cd, mayoritas anak jalanan tetap mengalami risiko kesehatan akibat paparan Pb yang bersifat neurotoksik. Dengan demikian, baik Cd maupun Pb sama-sama menimbulkan ancaman serius, meskipun mekanisme dan dampaknya berbeda.

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa HQ Cd lebih dipengaruhi oleh faktor perilaku paparan individu seperti frekuensi, lama paparan, dan laju inhalasi, sedangkan HQ Pb lebih ditentukan oleh konsentrasi lingkungan. Perbedaan ini mengimplikasikan bahwa strategi mitigasi untuk Cd perlu difokuskan pada perlindungan individu dengan mengurangi intensitas paparan, sedangkan mitigasi untuk Pb lebih efektif diarahkan pada pengendalian kualitas udara perkotaan. Temuan ini menegaskan perlunya intervensi kesehatan lingkungan yang komprehensif melalui pengendalian emisi kendaraan, pengawasan kualitas udara, serta perlindungan khusus bagi kelompok rentan. Penurunan median HQ, penurunan P95, dan untuk Cd target $P5 \leq 1$ dapat dijadikan indikator keberhasilan mitigasi. Secara keseluruhan, penelitian ini menekankan urgensi upaya kolaboratif antara pemerintah, masyarakat, dan sektor kesehatan untuk menekan dampak paparan logam berat pada anak jalanan di perkotaan.

4.5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, upaya mitigasi paparan logam berat pada anak jalanan perlu difokuskan sesuai dengan karakteristik determinan risiko masing-masing logam. Mengingat nilai Hazard Quotient (HQ) kadmium (Cd) dan timbal (Pb) yang sebagian besar berada di atas ambang aman berdasarkan simulasi Monte Carlo, maka tindakan prioritas untuk Cd diarahkan pada pengurangan intensitas paparan individu melalui pembatasan durasi dan frekuensi aktivitas di area padat lalu lintas serta penerapan perilaku protektif sederhana.

Pengendalian paparan Pb perlu difokuskan pada upaya pengurangan paparan lingkungan di titik aktivitas utama anak, seperti menjauhkan lokasi berkegiatan dari sumber emisi langsung. Selain itu, intervensi gizi sederhana berbasis komunitas perlu didorong untuk menurunkan absorpsi logam berat dan mendukung ketahanan

biologis anak. Pemantauan kesehatan disarankan dilakukan secara selektif pada kelompok dengan intensitas paparan tinggi, dengan indikator keberhasilan berupa penurunan nilai HQ, khususnya median dan persentil tinggi (P95), menuju ambang aman

4.5.3. Output Penelitian

Luaran penelitian ini telah dipublikasikan pada jurnal internasional terindeks sebagai bentuk diseminasi ilmiah

DAFTAR PUSTAKAN

- Abou Jaoudé, A. (Ed.). (2022). *The Monte Carlo Methods - Recent Advances, New Perspectives and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96413>
- Chen, H., Zhan, C., Liu, S., Zhang, J., Liu, H., Liu, Z., Liu, T., Liu, X., & Xiao, W. (2022). Pollution Characteristics and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Street Dust from a Typical Industrial Zone in Wuhan City, Central China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(17), 10970. <https://doi.org/10.3390/ijerph191710970>
- Cumber, S. N., & Tsoka-Gwegweni, J. M. (2015a). The Health Profile of Street Children in Africa: A Literature Review. *Journal of Public Health in Africa*, 6(2), 566. <https://doi.org/10.4081/jphia.2015.566>
- Flinders, C., Barnhart, B., Morrison, E. B., Anderson, P. D., & Landis, W. G. (2025). Probabilistic approaches for risk assessment and regulatory criteria development: current applications, gaps, and opportunities. *Integrated Environmental Assessment and Management*. <https://doi.org/10.1093/inteam/vjaf016>
- Huang, C., Li, C., Zhao, F., Zhu, J., Wang, S., & Sun, G. (2022a). The Association between Childhood Exposure to Ambient Air Pollution and Obesity: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8), 4491. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084491>
- Huang, H., Su, H., Li, X., Li, Y., Jiang, Y., Liu, K., Xie, X., Jia, Z., Zhang, H., Wang, G., Ye, Z., Cheng, X., Wen, J., Li, N., & Yu, Y. (2024). A Monte Carlo simulation-based health risk assessment of heavy metals in soils of the tropical region in southern China. *Environmental Geochemistry and Health*, 46(7), 234. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-02021-3>
- Jafarzadeh, N., Heidari, K., Meshkinian, A., Kamani, H., Mohammadi, A. A., & Conti, G. O. (2022a). Non-carcinogenic risk assessment of exposure to heavy metals in underground water resources in Saraven, Iran: Spatial distribution, monte-carlo simulation, sensitive analysis. *Environmental Research*, 204, 112002. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112002>
- Mallongi, A., Ane, R. La, & Birawida, A. B. (2017a). Spatial Lead Pollution in Aquatic Habitats and the Potential Risks in Makassar Coastal Area of South Sulawesi, Indonesia. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 16(2), 51. <https://doi.org/10.14710/jkli.16.2.51-55>

- Mallongi, A., Rauf, A. U., Daud, A., Hatta, M., Al-Madhoun, W., Amiruddin, R., Stang, S., Wahyu, A., & Astuti, R. D. P. (2022). Health risk assessment of potentially toxic elements in Maros karst groundwater: a Monte Carlo simulation approach. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 338–363. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2027528>
- Mallongi, A., Stang, Rauf, A. U., & Astuti, R. D. P. (2021). ANALYSIS OF HEALTH AND ECOLOGICAL RISKS DUE TO EXPOSURE TO PARTICULATE MATTER (PM 2.5) AND OCCURRENCE OF LUNG DISEASE AMONG SCHOOL CHILDREN IN MAROS PROVINCE, INDONESIA. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 56(4), 241–251. <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.56.4.20>
- Satarug, S., C. Gobe, G., A. Vesey, D., & Phelps, K. R. (2020a). Cadmium and Lead Exposure, Nephrotoxicity, and Mortality. *Toxics*, 8(4), 86. <https://doi.org/10.3390/toxics8040086>
- Shetty, B. R., Pai, B. J., Salmataj, S. A., & Naik, N. (2024). Assessment of Carcinogenic and non-carcinogenic risk indices of heavy metal exposure in different age groups using Monte Carlo Simulation Approach. *Scientific Reports*, 14(1), 30319. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81109-3>
- Su, R., Jiang, Y., Li, W., Ding, W., & Feng, L. (2025). Effects of Prenatal Arsenic, Cadmium, and Manganese Exposure on Neurodevelopment in Children: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Medicina*, 61(7), 1143. <https://doi.org/10.3390/medicina61071143>
- Wang, Z., Lu, X., Yang, Y., Yu, B., Lei, K., Pan, H., Fan, P., & Zuo, L. (2023). Estimation of Probabilistic Environmental Risk of Heavy Metal(loid)s in Resuspended Megacity Street Dust with Monte Carlo Simulation. *Minerals*, 13(3), 305. <https://doi.org/10.3390/min13030305>
- Wróblewski, M., Miłek, J., Godlewski, A., & Wróblewska, J. (2025). The Impact of Arsenic, Cadmium, Lead, Mercury, and Thallium Exposure on the Cardiovascular System and Oxidative Mechanisms in Children. *Current Issues in Molecular Biology*, 47(7), 483. <https://doi.org/10.3390/cimb47070483>

BAB V

PEMBAHASAN UMUM

5.1 Pembahasan umum

Pembahasan penelitian ini dimulai dengan kerangka Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) yang menegaskan bahwa paparan logam berat seperti kadmium (Cd) dan timbal (Pb) di kawasan perkotaan dengan lalu lintas padat merupakan isu kesehatan serius, terutama bagi anak jalanan yang setiap hari beraktivitas di lingkungan dengan tingkat pencemaran tinggi. ARKL memberikan pemahaman bahwa polusi udara tidak hanya menghasilkan pencemar yang bersifat lokal dan sesaat, tetapi juga memiliki dampak jangka Panjang yang signifikan terhadap kualitas hidup manusia (Ghorani-Azam et al., 2016).

Paparan logam berat, khususnya kadmium (Cd) dan timbal (Pb), Berisiko terhadap gangguan kesehatan anak jalanan di daerah perkotaan dengan lalu lintas padat (Hanfi & Yarmoshenko, 2020). Anak jalanan dianggap sebagai kelompok yang sangat rentan karena mereka menghabiskan sebagian besar waktu di lingkungan terbuka yang tercemar, memiliki akses terbatas ke makanan bergizi, dan kurangnya dukungan kesehatan (Cumber & Tsoka-Gwegweni, 2015b).

Berdasarkan hasil penelitian tahap 1 maka penelitian menekankan pentingnya melakukan biomonitoring sebagai langkah lanjutan. Untuk menguji hipotesis tentang hubungan antara paparan lingkungan dan dampak biologis, penelitian ini melakukan analisis korelasi antara kadar logam berat di udara dan dalam darah anak jalanan. Dimana menunjukkan bahwa hubungan antara kadar logam berat timbal (Pb) di udara dan dalam darah anak jalanan di daerah padat transportasi Kota Makassar memiliki arah korelasi positif dengan nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,041. Namun, kekuatan hubungan ini tergolong sangat lemah dan tidak signifikan secara statistik dengan nilai signifikansi (p) sebesar 0,758 ($p > 0,05$). Artinya, tidak terdapat hubungan yang bermakna antara kadar timbal di udara dengan kadar timbal dalam darah anak jalanan. Sementara itu, hubungan antara kadar kadmium (Cd) di udara dan dalam darah menunjukkan arah korelasi negatif dengan nilai r sebesar -0,172. Korelasi ini juga tergolong lemah dan tidak signifikan secara statistik dengan nilai p sebesar 0,189 ($p > 0,05$).

Hal ini mengindikasikan bahwa konsentrasi logam berat di udara ambien tidak selalu tercermin secara langsung dalam kadar darah, meskipun anak jalanan terpapar secara terus-menerus (Lee et al., 2024a). Beberapa faktor menjelaskan temuan ini, antara lain variabilitas spasial dan temporal dari polusi udara di perkotaan yang menyebabkan kadar pencemar sangat fluktuatif (Y. Zhang et al., 2025), serta tingginya mobilitas anak jalanan yang berpindah dari satu lokasi ke lokasi lain sehingga sulit dipetakan paparan personalnya secara akurat. Selain itu, terdapat kontribusi besar dari jalur paparan multipathway (Rana et al., 2024; Witkowska et al., 2021), misalnya melalui makanan yang terkontaminasi, air minum, debu jalanan, maupun kontak kulit dengan permukaan tercemar, yang justru lebih signifikan dalam menentukan kadar logam berat dalam tubuh dibandingkan udara ambien.

semata(Jahandari, 2020). Dari sisi fisiologis, darah juga bukan media akumulasi utama logam berat, melainkan hanya transport sementara. Darah berperan penting dalam transportasi dan detoksifikasi logam berat, tetapi bukan tempat akumulasi utama. Protein seperti metalotionein dalam darah terlibat dalam transportasi, detoksifikasi, dan penyimpanan logam. Protein ini juga melindungi sel darah dari kerusakan akibat stres oksidatif, dan sebagian logam yang terikat pada metalotionein dapat kembali ke ginjal untuk degradasi dan ekspresi lebih lanjut(Rahman et al., 2017); Cd lebih banyak tersimpan di ginjal dan hati, sedangkan Pb cenderung mengendap dalam tulang. Oleh karena itu, kadar logam dalam darah lebih menggambarkan paparan jangka pendek dan bukan beban tubuh jangka panjang(Lee et al., 2024b; Witkowska et al., 2021). Meskipun tidak ditemukan hubungan langsung antara kadar logam di udara dan dalam darah, penelitian ini tidak berhenti pada tahap tersebut. Untuk memahami dampak paparan logam berat secara lebih komprehensif, analisis diperluas dengan memeriksa parameter biologis yang lebih sensitif.

Pada tahap selanjutnya, penelitian ini memperluas analisis dengan memeriksa kadar Insulin-like Growth Factor-1 (IGF-1), sebuah hormon yang sangat penting dalam regulasi pertumbuhan anak, IGF-1 memegang peran sentral dalam regulasi pertumbuhan anak, melalui mekanisme kompleks yang melibatkan stimulasi pertumbuhan tulang di lempeng epifisis, anabolisme jaringan, serta pengaturan metabolisme(Fedorczak et al., 2023). Hasil penelitian menunjukkan bahwa Cd memiliki hubungan negatif yang signifikan dengan kadar IGF-1, terutama pada anak usia 7–12 tahun yang sedang berada pada fase pertumbuhan cepat. Hal ini menegaskan bahwa meskipun hubungan antara kadar udara dan darah tidak signifikan, Cd tetap memberikan dampak biologis nyata terhadap kesehatan, khususnya dalam menekan produksi hormon pertumbuhan melalui mekanisme stres oksidatif, gangguan homeostasis mineral seperti zink, dan hambatan pada jalur transduksi sinyal GH–IGF-1 di hati(Qu & Zheng, 2024). Penurunan kadar IGF-1 akibat paparan Cd berimplikasi langsung pada peningkatan risiko stunting, keterlambatan pubertas, dan gangguan perkembangan tulang pada anak(Zinia et al., 2023). Sebaliknya, Pb tidak menunjukkan hubungan signifikan dengan IGF-1, meskipun tetap berpotensi menimbulkan dampak kesehatan lain seperti gangguan neurokognitif, hematologis, serta metabolisme kalsium(Y.-M. Hsueh et al., 2017). Dengan demikian, Cd tampak lebih dominan sebagai pengganggu sistem endokrin dibanding Pb, yang menegaskan perlunya perhatian khusus terhadap logam ini dalam kaitannya dengan tumbuh kembang anak jalanan.

Dalam rangka memperkuat hasil biomonitoring dan analisis biologis, penelitian ini menerapkan pendekatan Monte Carlo Simulation (MCS) untuk memperkirakan risiko kesehatan akibat paparan Cd dan Pb secara probabilistik. Metode ini sangat penting karena mampu mengakomodasi ketidakpastian dan variabilitas data, sehingga hasilnya lebih representatif dibandingkan pendekatan deterministik yang hanya menghasilkan satu nilai rata-rata. Hasil MCS menunjukkan bahwa nilai Hazard Quotient (HQ) untuk Cd berada jauh di atas ambang aman dengan median 7, bahkan

dalam skenario optimis sekalipun ($P5 = 4$) tetap melebihi batas risiko, yang mengindikasikan tidak adanya kondisi paparan yang benar-benar aman bagi anak. Sementara itu, HQ untuk Pb memiliki median 2 dengan rentang 1–4, dan sekitar 95% hasil simulasi menunjukkan nilai di atas ambang aman.

Analisis sensitivitas terhadap determinan faktor risiko Kadmium (Cd) dan Timbal (Pb) menunjukkan bahwa logam-logam ini dipengaruhi oleh mekanisme yang berbeda. Untuk Cd, faktor perilaku individu seperti frekuensi, durasi, dan intensitas paparan memainkan peran yang lebih signifikan sebagai determinan risiko di mana durasi dan frekuensi paparan diidentifikasi sebagai faktor krusial yang memengaruhi risiko kanker jangka panjang untuk Cd (Soleimani et al., 2024), sedangkan risiko Pb lebih dominan ditentukan oleh konsentrasi lingkungan dalam menilai risiko kesehatan terkait Pb, mengalahkan faktor perilaku (D.-M. Xu et al., 2017). Temuan ini menunjukkan bahwa strategi mitigasi harus bersifat berbeda: Cd perlu ditangani dengan intervensi individual seperti edukasi perilaku, penggunaan masker, serta peningkatan status gizi, sedangkan Pb perlu dikendalikan melalui kebijakan lingkungan seperti pengendalian emisi kendaraan bermotor, penerapan zona rendah emisi, dan pemantauan kualitas udara secara berkelanjutan.

Secara integratif, hasil penelitian dari keempat tahap ini menyajikan gambaran yang komprehensif mengenai kompleksitas risiko kesehatan akibat paparan logam berat pada anak jalanan. ARKL memberikan dasar konseptual bahwa polusi udara merupakan masalah kesehatan lingkungan yang serius. Analisis hubungan kadar logam di udara dan darah menegaskan bahwa paparan multipathway dan faktor fisiologis membuat hubungan langsung sulit dibuktikan. Pemeriksaan IGF-1 kemudian menunjukkan bahwa Cd memiliki dampak signifikan terhadap sistem endokrin dan pertumbuhan anak, meskipun kadar darah tidak selalu mencerminkan akumulasi logam. Akhirnya, Monte Carlo Simulation menegaskan bahwa probabilitas risiko kesehatan sangat tinggi, baik untuk Cd maupun Pb, dengan implikasi mitigasi yang berbeda. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa paparan logam berat pada anak jalanan bukan hanya isu lingkungan, tetapi juga isu kesehatan masyarakat yang memerlukan penanganan lintas sektor. Upaya perlindungan harus dilakukan secara menyeluruh, melibatkan kebijakan lingkungan, intervensi kesehatan, peningkatan status gizi, serta perlindungan khusus bagi kelompok rentan seperti anak jalanan.

DAFTAR PUSTAKA

- Cumber, S. N., & Tsoka-Gwegweni, J. M. (2015). The health profile of street children in Africa: a literature review. *Journal of Public Health in Africa*. <https://doi.org/10.4081/jphia.2015.566>
- Fedorczak, A., Lewiński, A., & Stawerska, R. (2023). Involvement of Sirtuin 1 in the Growth Hormone/Insulin-like Growth Factor 1 Signal Transduction and Its Impact on Growth Processes in Children. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(20), 15406. <https://doi.org/10.3390/ijms242015406>
- Ghorani-Azam, A., Riahi-Zanjani, B., & Balali-Mood, M. (2016). Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in Iran. *Journal of Research in Medical Sciences*, 21(1). <https://doi.org/10.4103/1735-1995.189646>
- Hanfi, M. Y., & Yarmoshenko, I. V. (2020). Health risk assessment quantification from heavy metals contamination in the urban soil and urban surface deposited sediment. *Journal of Taibah University for Science*, 14(1), 285–293. <https://doi.org/10.1080/16583655.2020.1735735>
- Hsueh, Y.-M., Lee, C.-Y., Chien, S.-N., Chen, W.-J., Shiue, H.-S., Huang, S.-R., Lin, M.-I., Mu, S.-C., & Hsieh, R.-L. (2017). Association of blood heavy metals with developmental delays and health status in children. *Scientific Reports*, 7(1), 43608. <https://doi.org/10.1038/srep43608>
- Jahandari, A. (2020). Pollution status and human health risk assessments of selected heavy metals in urban dust of 16 cities in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(18), 23094–23107. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08585-8>
- Lee, E., Hong, S., Kim, Y.-D., Lee, D.-I., & Eom, S.-Y. (2024a). Evaluating the Impact of Airborne Fine Particulate Matter and Heavy Metals on Oxidative Stress via Vitamin Supplementation. *Toxics*, 12(7), 465. <https://doi.org/10.3390/toxics12070465>
- Qu, F., & Zheng, W. (2024). Cadmium Exposure: Mechanisms and Pathways of Toxicity and Implications for Human Health. *Toxics*, 12(6), 388. <https://doi.org/10.3390/toxics12060388>
- Rahman, M. T., Haque, N., Abu Kasim, N. H., & De Ley, M. (2017). *Origin, Function, and Fate of Metallothionein in Human Blood* (pp. 41–62). https://doi.org/10.1007/112_2017_1
- Rana, Md. S., Wang, Q., Wang, W., Enyoh, C. E., Islam, Md. R., Isobe, Y., & Kabir, M. H. (2024). Sources, Distribution, and Health Implications of Heavy Metals in Street Dust across Industrial, Capital City, and Peri-Urban Areas of Bangladesh. *Atmosphere*, 15(9), 1088. <https://doi.org/10.3390/atmos15091088>
- Soleimani, A., Toolabi, A., Mansour, S. N., Abdollahnejad, A., Akther, T., Fouladi-Fard, R., Miri, M., & Mohammadi, A. (2024). Health risk assessment and spatial

- trend of metals in settled dust of surrounding areas of Lake Urmia, NW Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 104(5), 1172–1185. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2032013>
- Witkowska, D., Słowik, J., & Chilicka, K. (2021). Heavy Metals and Human Health: Possible Exposure Pathways and the Competition for Protein Binding Sites. *Molecules*, 26(19), 6060. <https://doi.org/10.3390/molecules26196060>
- Xu, D.-M., Yan, B., Chen, T., Lei, C., Lin, H.-Z., & Xiao, X.-M. (2017). Contaminant characteristics and environmental risk assessment of heavy metals in the paddy soils from lead (Pb)-zinc (Zn) mining areas in Guangdong Province, South China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(31), 24387–24399. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0052-9>
- Zhang, Y., Chen, X., Luan, M., Yao, Y., Xu, Y., Chen, W., Li, X., Liu, X., Zheng, M., & Zhu, T. (2025). Characteristics of personal exposure to metals in PM_{2.5} and their implications for epidemiological studies: New insights from a panel study of the elderly in Beijing. *Environmental Research*, 285, 122697. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122697>
- Zinia, S. S., Yang, K.-H., Lee, E. J., Lim, M.-N., Kim, J., Kim, W. J., Park, C., Kim, H. J., Jung, S.-W., Hong, S., Jung, A.-R., Lee, J., Do Yu, S., Hwang, N., Jeong, D. J., Seo, H. W., Kim, H. S., Lee, M., Park, E. K., ... Sim, C. S. (2023). Effects of heavy metal exposure during pregnancy on birth outcomes. *Scientific Reports*, 13(1), 18990. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46271-0>

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN UMUM

6.1 Kesimpulan umum

Kesimpulan Umum Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui Tiga tahapan untuk mengevaluasi risiko paparan logam berat kadmium (Cd) dan timbal (Pb) terhadap anak jalanan di Kota Makassar.

1. Analisis kualitas udara ambien (Topik I). Analisis intake dan perhitungan Hazard Quotient (HQ) memperlihatkan perbedaan yang signifikan antara kedua logam ini. Cd pada paparan real life menunjukkan HQ <1 dimana dapat diartikan belum memberikan risiko gangguan Kesehatan pada anak jalanan, namun proyeksi lifetime exposure menunjukkan peningkatan nilai HQ > 1 hingga melampaui ambang aman, sehingga dapat diartikan bahwa Cd dalam jangka panjang berisiko menimbulkan gangguan Kesehatan pada anak jalanan dan pada analisis intake Pb menunjukkan Batasan tidak aman pada real life dan life time dan analisis HQ menunjukkan nilai HQ yang sangat tinggi sejak paparan realtime, bahkan meningkat secara drastis hingga ribuan kali lipat pada paparan life time. Hal ini menegaskan bahwa tidak ada tingkat paparan Pb yang aman, mengingat sifatnya yang neurotoksik dan mampu menyebabkan penurunan IQ, gangguan perilaku, serta hambatan perkembangan kognitif pada anak. Temuan ini menegaskan adanya risiko Kesehatan pada anak jalanan yang di pengaruhi oleh logam Cd dan Pb di daerah padat transportasi kota Makassar.
2. Anak jalanan di daerah dengan lalu lintas tinggi di Kota Makassar, Indonesia. secara konsisten terpapar kadmium (Cd) dan timbal (Pb), korelasi antara konsentrasi udara dan darah sangat lemah yang mencerminkan peningkatan kerentanan. sebagian besar kadar Pb dan Cd darah berada dalam rentang aman deteksi kadar tetapi menjadi potensi risiko kesehatan akibat paparan Cd dan Pb, Cd mempengaruhi kadar IGF-1 Pada anak jalanan, khususnya pada anak usia pubertas awal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai Cd dan Pb relatif rendah, sifat bioakumulatif logam berat tetap menimbulkan kekhawatiran karena dapat terakumulasi dalam jaringan dan menimbulkan gangguan kesehatan jangka Panjang
3. Simulasi probabilistik risiko kesehatan (Topik III). Hasil simulasi probabilistik Monte Carlo memperlihatkan bahwa nilai Hazard Quotient (HQ) untuk Cd berada jauh di atas ambang aman dengan median 7, P5 sebesar 4, dan P95 sebesar 11. Hal ini berarti bahwa bahkan dalam skenario paling optimis, seluruh paparan Cd tetap berisiko. Sementara itu, HQ untuk Pb memiliki median 2, dengan P5 sebesar 1 dan P95 sebesar 4. Meskipun relatif lebih rendah dibandingkan Cd, mayoritas anak jalanan tetap mengalami risiko kesehatan akibat paparan Pb yang bersifat neurotoksik. Dengan demikian, baik Cd maupun Pb sama-sama menimbulkan ancaman serius, meskipun mekanisme dan dampaknya berbeda.

Hasil ketiga tahapan menegaskan bahwa paparan Cd dan Pb di kawasan padat transportasi memberikan ancaman signifikan terhadap anak jalanan. Cd terbukti berhubungan dengan penurunan kadar IGF-1 melalui mekanisme hepatotoksik, nefrotoksik, dan stres oksidatif, sedangkan Pb dominan bersifat neurotoksik dan hematotoksik dengan akumulasi kronik di jaringan tulang. Kompleksitas jalur paparan multipathway, status gizi marginal, serta aktivitas anak di jalanan memperbesar kerentanan biologis mereka. Penelitian ini secara komprehensif menggambarkan keterkaitan antara paparan logam berat di udara ambien, akumulasi biologis dalam darah, respons biomedik terhadap kadar hormon Insulin-like Growth Factor-1 (IGF-1), serta probabilitas risiko kesehatan yang diestimasi melalui *Monte Carlo Simulation* pada anak jalanan di kawasan padat transportasi Kota Makassar. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai *Hazard Quotient* (HQ) untuk timbal (Pb) telah melampaui ambang batas aman ($HQ > 1$), menandakan adanya risiko kesehatan yang nyata terutama terhadap sistem saraf dan hematologis anak. Sementara itu, paparan kadmium (Cd) masih berada di bawah ambang batas aman, tetapi bersifat akumulatif dan berpotensi menimbulkan efek kronik apabila pajanan berlangsung terus-menerus. Hubungan antara kadar Cd dan Pb di udara dengan kadar logam berat dalam darah menunjukkan korelasi yang lemah dan tidak signifikan secara statistik, yang mencerminkan kompleksitas jalur paparan multipathway seperti inhalasi, konsumsi makanan, dan kontak kulit, serta dipengaruhi oleh faktor perilaku, lama paparan, dan kondisi fisiologis anak jalanan yang beragam.

Pendekatan *Monte Carlo Simulation* dalam penelitian ini berperan sebagai tahap sintesis yang mengintegrasikan hasil dari seluruh rangkaian analisis sebelumnya. Tahap pertama yang menilai risiko non-karsinogenik melalui nilai *Hazard Quotient* (HQ) memberikan gambaran awal tentang tingkat bahaya paparan Cd dan Pb di udara ambien. Tahap kedua, yaitu analisis hubungan antara kadar logam berat di udara dan dalam darah, memvalidasi jalur paparan yang menunjukkan bahwa akumulasi logam dalam tubuh anak jalanan memang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan perilaku pajanan. Selanjutnya, tahap ketiga yang menilai kadar hormon Insulin-like Growth Factor-1 (IGF-1) memberikan bukti biomedik tentang respons fisiologis anak terhadap paparan tersebut, meskipun hubungan statistiknya belum signifikan. Ketiga hasil ini kemudian dipadukan dalam model *Monte Carlo Simulation* untuk mengakomodasi ketidakpastian, variabilitas individu, dan distribusi probabilistik dari parameter paparan. Dengan demikian, *Monte Carlo Simulation* tidak hanya memperkuat hasil deterministik HQ, tetapi juga memperluasnya menjadi estimasi probabilistik yang lebih realistis, menggambarkan seberapa besar peluang risiko kesehatan terjadi pada populasi anak jalanan di kondisi sebenarnya. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi faktor paling sensitif yang berkontribusi terhadap risiko (seperti frekuensi dan durasi paparan), sehingga dapat digunakan sebagai dasar pengambilan kebijakan intervensi kesehatan lingkungan yang lebih tepat sasaran. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa paparan logam berat di lingkungan perkotaan berkontribusi terhadap peningkatan risiko

kesehatan anak jalanan, meskipun belum tampak perubahan signifikan pada biomarker pertumbuhan IGF-1. Oleh karena itu, diperlukan upaya pengendalian emisi lalu lintas, peningkatan status gizi, dan pemantauan biomarker kesehatan anak secara berkala guna mencegah dampak jangka panjang dari paparan Cd dan Pb terhadap proses pertumbuhan dan perkembangan mereka.

6.2 Saran Umum

1. Untuk Pemerintah

Pemerintah perlu memperkuat intervensi kesehatan dan lingkungan melalui program gizi, edukasi, perlindungan individu, serta biomonitoring pada anak jalanan, dengan pelaksanaan oleh Dinas Kesehatan Kota Makassar dan Dinas Sosial Kota Makassar, serta dukungan kebijakan dari Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.

2. Untuk Masyarakat

Masyarakat diharapkan meningkatkan kesadaran terhadap risiko paparan logam berat melalui penerapan perilaku hidup sehat, penggunaan masker di area padat lalu lintas, serta partisipasi dalam program edukasi dan kesehatan lingkungan.

3. Untuk Penelitian Selanjutnya

Penelitian selanjutnya disarankan melakukan studi longitudinal, analisis multi-polutan, serta evaluasi efektivitas intervensi gizi dan perlindungan untuk memahami dampak jangka panjang paparan Cd dan Pb.