

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Logam berat merupakan zat toksik yang berpotensi menimbulkan kerusakan pada organisme perairan. Sumber pencemaran logam berat umumnya berasal dari aktivitas pertambangan, peleburan logam, berbagai kegiatan industri, serta limbah domestik yang mengandung unsur logam, dan juga dari sektor pertanian melalui penggunaan pupuk berbahan logam. Paparan bahan pencemar logam berat telah menyebabkan penurunan kualitas air dan sedimen secara signifikan di berbagai badan perairan, seperti sungai, danau, dan waduk (Rahayu & Mangkoedihardjo, 2022). Logam berat dapat terakumulasi dalam tubuh makhluk hidup melalui mekanisme bioakumulasi, sehingga meningkatkan konsentrasi unsur kimia di dalam jaringan organisme. Dampak kesehatan yang ditimbulkan pada manusia bergantung pada lokasi ikatan logam berat tersebut di dalam tubuh. Sifat toksik logam berat dapat menghambat aktivitas enzim, yang pada akhirnya mengganggu proses metabolisme tubuh (Masruddin & Mulasari, 2021).

Air raksa atau merkuri (Hg) merupakan unsur logam yang terdapat secara alami di lingkungan dan menjadi satu-satunya logam yang berwujud cair pada suhu kamar. Hg murni memiliki warna keperakan hingga putih keabu-abuan, bersifat cair, tidak berbau, dan tampak mengilap. Pada suhu pemanasan sekitar 357°C, Hg akan mengalami penguapan. Kandungan Hg di kerak bumi tergolong sangat kecil, yaitu sekitar 0.08 mg/L, dan umumnya banyak terakumulasi di wilayah pertambangan. Dibandingkan dengan logam berat lainnya, Hg dikenal sebagai logam berat dengan tingkat toksisitas yang sangat tinggi. Pelepasan Hg ke lingkungan terutama berasal dari aktivitas industri, seperti industri farmasi, kertas dan pengawet *pulp*, pertanian, industri klorin, serta produksi soda kaustik. Hg merupakan unsur berbahaya yang tersebar luas di atmosfer, litosfer, dan perairan permukaan. Keberadaan Hg di lingkungan perairan dapat disebabkan oleh kegiatan pertambangan, sisa pembakaran batu bara, limbah industri, penggunaan fungisida dan pestisida, serta limbah domestik. Hg merupakan salah satu logam berat yang bersifat toksik dan memiliki kemampuan untuk mengalami bioakumulasi serta biomagnifikasi melalui rantai makanan. Di lingkungan, Hg dapat mengalami transformasi menjadi berbagai bentuk organik yang lebih berbahaya, seperti metil-merkuri, dimetil-merkuri, dan etil-merkuri (Rahayu & Mangkoedihardjo, 2022).

Hg juga termasuk logam berat yang bersifat toksik dan mampu mengalami proses bioakumulasi serta biomagnifikasi di sepanjang rantai makanan. Di lingkungan, Hg dapat mengalami perubahan menjadi bentuk organik yang lebih berbahaya, seperti metil-merkuri, dimetil-merkuri, dan etil-merkuri. Secara kimia, Hg dikenal dengan nama *hydragyrum*, dilambangkan dengan Hg, memiliki nomor atom 80 dan bobot atom 200,59 (Rosita & Mayaserli, 2025).

Hg banyak dijumpai dalam limbah, khususnya di lingkungan perairan, dan dapat mengalami perubahan akibat aktivitas mikroorganisme menjadi metilmerkuri (MeHg). MeHg memiliki sifat sangat toksik, kemampuan berikatan yang kuat, serta tingkat kelarutan yang tinggi, terutama di dalam tubuh organisme akuatik (Amalia et al., 2024). Berdasarkan bentuk kimianya, merkuri diklasifikasikan ke dalam tiga spesies utama, yaitu merkuri elemental (Hg^0), merkuri anorganik, dan merkuri organik. Di antara ketiga bentuk tersebut, merkuri organik berupa MeHg dikenal sebagai bentuk yang paling berbahaya. MeHg terbentuk melalui proses metilasi merkuri anorganik oleh mikroorganisme, seperti bakteri pereduksi sulfat dan bakteri metanogen, yang hidup di lingkungan perairan. Senyawa ini selanjutnya mengalami akumulasi dalam organisme perairan dan banyak ditemukan pada bahan pangan laut, terutama ikan dan produk hasil laut lainnya (Abdurrosyid et al., 2025).

Data prevalensi kadar MeHg antarnegara pada periode 2019–2024 menunjukkan perbedaan yang jelas antara negara maju dan negara berkembang. Negara maju umumnya mengalami penurunan prevalensi yang signifikan, sedangkan negara berkembang cenderung menunjukkan kondisi yang stabil atau meningkat, khususnya di wilayah dengan aktivitas pertambangan. Di Amerika Serikat, data NHANES mencatat penurunan proporsi individu dengan kadar MeHg dalam darah $>5.8 \mu\text{g/L}$ dari sekitar 6% menjadi kurang dari 4%. Di China, prevalensi relatif tidak banyak berubah dan berada pada kisaran 10–15% di kawasan industri. Negara-negara Eropa, seperti Kepulauan Faroe, melaporkan prevalensi yang rendah ($<3\%$), berbeda kontras dengan Afrika Sub-Sahara yang mencatat angka 15–47% akibat aktivitas pertambangan emas skala kecil (ASGM). Sementara itu, di Indonesia, sekitar 20–66% pekerja tambang dilaporkan memiliki kadar Hg yang melebihi ambang batas. Pada tahun 2022, prevalensi gejala neurologis pada masyarakat di wilayah pascatambang Kabupaten Luwu mencapai 60%, dengan 32.5% responden memiliki kadar Hg pada rambut dalam kategori sedang (Ishar et al., 2024).

World Health Organization (WHO) menetapkan Hg, khususnya MeHg, sebagai salah satu dari sepuluh bahan kimia yang menjadi prioritas perhatian dalam kesehatan masyarakat global. MeHg memiliki tingkat bioavailabilitas yang tinggi, sehingga mudah diserap melalui saluran pencernaan dan selanjutnya didistribusikan ke sistem saraf pusat. Paparan MeHg diketahui berpotensi menimbulkan kerusakan otak, gangguan pendengaran dan kemampuan bicara, gangguan fungsi saraf sensorik maupun motorik, serta keterlambatan perkembangan mental. Selain berdampak pada sistem saraf, Hg juga dapat memengaruhi sistem organ lainnya, termasuk penglihatan, sistem muskuloskeletal, sistem pencernaan, dan sistem kardiovaskular (Abdurrosyid et al., 2025).

MeHg merupakan neurotoksin yang berdampak pada Sistem Saraf Pusat (SSP) dan dapat menyebabkan gangguan kemampuan bicara, pendengaran, serta penglihatan, termasuk kondisi seperti demensia dan

disartria. Selain menyerang sistem saraf, MeHg juga berpotensi menimbulkan kerusakan pada sistem kardiovaskular. Dibandingkan dengan bentuk Hg lainnya, MeHg memiliki tingkat toksisitas yang jauh lebih tinggi. Sifatnya yang mampu menembus membran plasma dengan mudah memungkinkan MeHg melewati plasenta. Paparan MeHg pada janin dapat meningkatkan risiko kelahiran prematur serta menyebabkan gangguan mental dan fisik yang bersifat permanen pada bayi. Selain itu, paparan MeHg dalam kadar rendah pada bayi dan anak usia dini dapat berdampak negatif terhadap proses perkembangan, kemampuan belajar, dan perilaku (Al-Sulaiti et al., 2022).

Berdasarkan Profil Kesehatan Indonesia tahun 2023 yang diterbitkan Kementerian Kesehatan, jumlah ibu hamil di Indonesia diperkirakan mencapai sekitar 4,89 juta orang, yang dihitung berdasarkan cakupan kunjungan *Antenatal Care* (ANC) K1–K4 secara nasional. Di Provinsi Sulawesi Selatan, jumlah ibu hamil dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan pola yang berfluktuasi, dengan data terbaru mencatat sekitar 176.097 ibu hamil pada tahun 2024. Angka tersebut mengalami peningkatan dibandingkan tahun 2023 yang tercatat sebanyak 158.028, setelah sebelumnya menurun dari 176.715 pada tahun 2021. Sementara itu, menurut data Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Makassar tahun 2022, jumlah ibu hamil di Kota Makassar tercatat sebesar 29.789 jiwa.

Paparan MeHg merupakan risiko yang lebih besar bagi kelompok rentan, terutama ibu hamil. Selama masa kehamilan, MeHg mampu melewati plasenta dan mencapai janin, sehingga berpotensi mengganggu perkembangan sistem saraf yang masih dalam tahap pematangan. Keracunan Hg pada kehamilan diketahui berkaitan dengan berbagai dampak kesehatan, termasuk gangguan neurologis permanen hingga usia dewasa, terjadinya kelainan kongenital, berat badan lahir rendah, keguguran, serta kejadian lahir mati (*stillbirth*) (Ekawanti & Priyambodo, 2020).

MeHg dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui berbagai jalur, antara lain melalui konsumsi makanan seperti ikan atau pangan lain yang terkontaminasi, paparan dari lingkungan maupun aktivitas pekerjaan, serta penggunaan produk tertentu, seperti kosmetik yang mengandung Hg, krim, atau vaksin. Di lingkungan, MeHg terutama terbentuk akibat emisi industri dan selanjutnya masuk ke dalam rantai makanan melalui mekanisme biomagnifikasi. Senyawa ini terakumulasi dalam jaringan organisme perairan, khususnya ikan mangsa, dan kemudian dapat berpindah ke manusia melalui konsumsi ikan yang terkontaminasi (Nuraini et al., 2023).

United States Environmental Protection Agency (USEPA) menetapkan *Reference Dose* (RfD) untuk paparan kronis MeHg sebesar 1×10^{-4} mg/kg berat badan per hari, yang bertujuan melindungi perkembangan sistem saraf selama masa kehamilan. Nilai dosis tersebut diperkirakan setara dengan kadar MeHg dalam darah sebesar 5.8 µg/L serta konsentrasi total merkuri dalam rambut sekitar 1.1 µg/g. Selain itu, kadar MeHg sebesar 5,8 µg/L dalam darah tali pusat digunakan sebagai ambang tindakan oleh USEPA dan USCDC, yang

diperkirakan setara dengan konsentrasi MeHg dalam darah ibu sebesar 3.5 µg/L. Sementara itu, WHO menetapkan asupan harian MeHg yang dapat ditoleransi sementara (*provisional tolerable daily intake*) sebesar 2.3×10^{-4} mg/kg berat badan per hari, dengan nilai yang sebanding dengan RfD yang ditetapkan oleh USEPA (Wickliffe et al., 2021).

Sejumlah penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pengukuran kadar MeHg dalam darah merupakan indikator penting untuk menilai tingkat paparan pada ibu hamil. Studi yang dilakukan oleh Abedinlah et al. (2024) melaporkan dari total 215 sampel darah ibu hamil yang dianalisis, diperoleh nilai median kadar MeHg sebesar 1.70 µg/L dengan kisaran 0.11–9.90 µg/L. Sebanyak 11.2% responden tercatat memiliki kadar MeHg dalam darah yang melebihi nilai rujukan 3.5 µg/L, yang menunjukkan adanya paparan MeHg pada tingkat yang berpotensi menimbulkan risiko kesehatan, terutama terhadap perkembangan neurologis janin (Abedinlah et al., 2021).

Penelitian lain oleh Wells et al. (2022) semakin menguatkan temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa konsentrasi Merkuri Total (THg) dalam darah merupakan indikator yang sangat kuat untuk memperkirakan paparan MeHg pada individu yang mengonsumsi ikan dan kerang, termasuk perempuan usia reproduktif. Berdasarkan analisis data NHANES periode 2011–2016, diperoleh rasio rata-rata MeHg terhadap merkuri total dalam darah sekitar 0,75, dengan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya kadar THg. Model statistik yang diterapkan menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat tinggi ($R^2 > 0,95$), sehingga pengukuran THg dalam darah dapat digunakan secara andal sebagai pendekatan untuk mengestimasi paparan MeHg (Wells et al., 2022).

Biomonitoring merupakan metode pemantauan polutan dengan memanfaatkan agen biologis yang mampu mengakumulasi polutan secara efektif sehingga mencerminkan kondisi paparan lingkungan secara nyata (Pertiwi et al., 2022). Dalam Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL), biomonitoring digunakan sebagai dasar penilaian paparan karena ARKL berfokus pada identifikasi bahaya, analisis dosis–respon, pengukuran paparan, serta penentuan tingkat risiko, bukan pada pencarian hubungan sebab–akibat seperti kajian epidemiologi. perhitungan berbasis lingkungan biasanya mengasumsikan paparan maksimum (*worst-case scenario*) dan tidak sepenuhnya memperhitungkan faktor biologis, seperti fraksi yang benar-benar terserap (*bioavailability*), efisiensi absorpsi, metabolisme, distribusi jaringan, dan ekskresi (Nur et al., 2021).

Selama ini, sebagian besar kajian ARKL masih mengandalkan data lingkungan (misalnya konsentrasi dalam air, pangan, atau media lingkungan lainnya) tanpa dilengkapi dengan data biomarker seperti darah atau urin. Pendekatan ini berpotensi menghasilkan estimasi paparan yang berlebihan, karena perhitungan intake berbasis data lingkungan umumnya mengasumsikan skenario paparan maksimum dan tidak sepenuhnya mempertimbangkan faktor biologis individu. Akibatnya, nilai asupan harian, *Hazard Quotient* (HQ), maupun cancer risk yang dihitung dari data lingkungan saja dapat lebih tinggi

dibandingkan dosis internal aktual yang tercermin melalui biomarker (Santonen et al., 2023).

Human Biomonitoring (HBM) menjadi instrumen penting dalam penilaian paparan bahan kimia dan risiko kesehatannya karena mampu menggambarkan paparan internal yang terintegrasi dari berbagai sumber dan jalur pajanan, sekaligus memperhitungkan variasi individu dalam metabolisme, pola makan, dan gaya hidup. Dengan mengukur konsentrasi aktual bahan kimia atau metabolitnya dalam tubuh manusia, HBM melengkapi penilaian paparan eksternal dan memberikan informasi yang lebih akurat dalam evaluasi risiko kesehatan (Santonen et al., 2023).

Hal ini sejalan dengan temuan Liang et al. (2013) yang menunjukkan bahwa konsumsi ikan merupakan sumber utama pajanan MeHg pada populasi umum di Hong Kong, yang ditunjukkan oleh hubungan positif dan signifikan antara frekuensi konsumsi ikan dan konsentrasi MeHg dalam plasma darah. Rata-rata konsentrasi THg dan MeHg dalam plasma masing-masing sebesar 0.63 $\mu\text{g/L}$ dan 0.28 $\mu\text{g/L}$, serta tidak menunjukkan perbedaan bermakna berdasarkan jenis kelamin maupun kelompok umur. Studi tersebut juga membandingkan estimasi pajanan MeHg berbasis lingkungan melalui kandungan MeHg ikan dan laju konsumsi (EDI_{Fish}) dengan estimasi berbasis biomarker darah menggunakan model biokinetik ($\text{EDI}_{\text{Blood}}$), dan menemukan bahwa kedua pendekatan menghasilkan estimasi pajanan yang relatif sebanding.

Berdasarkan uraian tersebut, pajanan metil-merkuri pada ibu hamil merupakan masalah kesehatan lingkungan yang dipengaruhi oleh berbagai faktor, mulai dari sumber pencemar di lingkungan hingga jalur pajanan, terutama melalui konsumsi ikan. Selain itu, kondisi biologis individu juga berperan dalam menentukan seberapa besar merkuri yang benar-benar masuk dan terserap ke dalam tubuh. Selama ini, ARKL umumnya masih mengandalkan data lingkungan, seperti kadar merkuri dalam pangan atau media lingkungan lainnya, yang sering diasumsikan sebagai paparan maksimum. Pendekatan ini belum sepenuhnya mencerminkan pajanan internal yang sebenarnya, khususnya pada kelompok rentan seperti ibu hamil. Oleh karena itu, penggunaan biomarker biologis, terutama pengukuran kadar merkuri atau metil-merkuri dalam darah, menjadi penting karena dapat menggambarkan pajanan yang benar-benar terjadi di dalam tubuh. Data biomonitoring ke dalam kerangka ARKL diharapkan dapat menghasilkan penilaian risiko kesehatan yang lebih akurat dan realistis, khususnya bagi ibu hamil yang tinggal di wilayah pesisir seperti Kota Makassar.

1.2 Rumusan Masalah

1. Berapa kadar MeHg dalam darah ibu hamil di Kota Makassar?
2. Bagaimana tingkat pajanan MeHg pada ibu hamil di Kota Makassar berdasarkan hasil pengukuran kadar MeHg dalam darah?

3. Bagaimana tingkat risiko kesehatan akibat paparan MeHg pada ibu hamil di Kota Makassar jika dibandingkan dengan nilai rujukan toksikologi yang berlaku?

1.3 Tujuan Penelitian

1.3.1 Tujuan Umum

Untuk menganalisis risiko paparan MeHg pada ibu hamil di Kota Makassar berdasarkan pengukuran kadar Hg dalam darah.

1.3.2 Tujuan khusus

- a. Menganalisis kadar Hg dalam darah ibu hamil di Kota Makassar.
- b. Mengestimasi asupan harian MeHg pada ibu hamil menggunakan data biomarker darah.
- c. Menganalisis *Margin of exposure* MeHg pada ibu hamil
- d. Menganalisis risiko kesehatan akibat paparan MeHg pada ibu hamil.

1.4 Manfaat Penelitian

1.4.1 Manfaat Ilmiah

Penelitian ini memberikan bukti ilmiah berbasis biomonitoring mengenai tingkat paparan dan risiko kesehatan MeHg pada ibu hamil. Hasil penelitian memperkuat penerapan ARKL dengan menggunakan kadar MeHg dalam darah sebagai indikator paparan pada kelompok rentan.

1.4.2 Manfaat Institusi

Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar data ilmiah bagi instansi kesehatan dan lingkungan dalam penyusunan kebijakan pengendalian paparan Hg, khususnya pada ibu hamil, serta sebagai bahan pertimbangan dalam program pemantauan lingkungan dan perlindungan kesehatan ibu dan anak di Kota Makassar.

1.4.3 Manfaat Praktisi

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dalam upaya pencegahan dan pengendalian paparan MeHg pada ibu hamil, serta sebagai dasar edukasi kesehatan bagi masyarakat, terutama terkait konsumsi pangan yang berpotensi mengandung Hg.

1.5 Kajian Teori

1.5.1 Tinjauan Umum Tentang Merkuri

a. Definisi Merkuri

Hg atau air raksa dari bahasa Latin *mercurius*, yang berarti perak cair merupakan unsur kimia yang dilambangkan dengan Hg dan memiliki nomor atom 80 dalam tabel periodik. Unsur ini termasuk dalam golongan logam transisi, bersifat alami, dan menjadi satu-satunya logam yang berada dalam fase cair pada

suhu lingkungan. Merkuri tergolong logam berat dengan warna keperakan, tampak mengilap, tidak berbau, serta mudah menguap. Selain itu, merkuri merupakan salah satu dari lima unsur yang dapat berwujud cair pada suhu kamar, bersama dengan sesium, francium, galium, dan brom (Widianti et al., 2024).

Sebagai *trace element*, merkuri memiliki massa jenis dan daya hantar listrik yang tinggi, dengan titik beku $-38,87^{\circ}\text{C}$, titik didih $356,90^{\circ}\text{C}$, serta berat jenis sekitar $13,55\text{ g/cm}^3$. Sifat fisik dan kimia ini menyebabkan merkuri banyak dimanfaatkan dalam berbagai aktivitas industri dan laboratorium, termasuk dalam proses amalgamasi pada pertambangan emas. Namun, pemanfaatan tersebut juga meningkatkan potensi pelepasan merkuri ke lingkungan, khususnya apabila pengelolaannya tidak dilakukan secara aman dan terkendali (Widianti et al., 2024).

Masuknya merkuri ke badan perairan umumnya berasal dari limbah aktivitas manusia, seperti pertambangan, yang menyebabkan logam ini terdispersi dan terakumulasi dalam ekosistem akuatik. Merkuri yang terlarut di perairan dapat teradsorpsi oleh partikel halus, kemudian terbawa aliran sungai hingga ke muara. Interaksi dengan arus pasang menyebabkan partikel-partikel tersebut mengendap, sehingga konsentrasi merkuri dalam sedimen umumnya lebih tinggi dibandingkan di kolom air. Proses sedimentasi ini menjadikan muara sungai sebagai lokasi akumulasi logam berat, yang berpotensi meningkatkan paparan merkuri pada organisme perairan dan rantai makanan (Rahayu & Mangkoedihardjo, 2022).

b. Sumber Merkuri

Keberadaan Hg di lingkungan berasal dari kombinasi sumber alami dan aktivitas antropogenik. Sumber alami terutama berkaitan dengan proses geologis yang melepaskan merkuri dari tanah dan kerak bumi ke lingkungan perairan dan atmosfer. Pelepasan ini dapat dipengaruhi oleh kondisi geologis suatu wilayah, termasuk aktivitas tektonik, letusan gunung berapi, rembesan alami dari kerak bumi, serta fenomena geotermal. Selain itu, peristiwa alam seperti kebakaran hutan juga berkontribusi terhadap pelepasan merkuri ke lingkungan. Dalam konteks ini, merkuri dapat ditemukan sebagai logam jejak dalam tanah, gas alam, maupun minyak bumi mentah, terutama di wilayah dengan kandungan geologi yang kaya akan merkuri (Al-Sulaiti et al., 2022).

Di sisi lain, sumber antropogenik memberikan kontribusi yang jauh lebih signifikan terhadap peningkatan beban merkuri global. Aktivitas manusia diperkirakan menyumbang emisi merkuri dalam jumlah besar, yang sangat berkaitan dengan perkembangan industri dan kebutuhan energi. Kegiatan seperti penambangan dan

peleburan logam, pembakaran batu bara, penyulingan minyak bumi, proses klor-alkali, serta produksi semen merupakan sumber utama emisi merkuri ke lingkungan. Selain itu, penambangan emas skala kecil dan artisanal (ASGM) menjadi salah satu kontributor terbesar emisi merkuri antropogenik, terutama di negara berkembang, karena penggunaan merkuri secara langsung dalam proses amalgamasi emas (Al-Sulaiti et al., 2022).

Selain emisi yang berasal dari aktivitas industri dan pembakaran bahan bakar fosil, merkuri juga dilepaskan ke lingkungan melalui penggunaannya secara sengaja dalam berbagai produk dan proses. Hg masih digunakan dalam sejumlah produk yang mengandung Hg, seperti lampu, baterai, instrumen pengukur, dan peralatan medis, termasuk termometer dan sphygmomanometer, serta dalam amalgam gigi. Limbah dari produk-produk tersebut berpotensi menjadi sumber emisi merkuri, terutama apabila tidak dikelola dengan baik dan mengalami pembakaran terbuka atau tidak terkontrol. Penggunaan merkuri secara sengaja juga terjadi dalam proses industri tertentu, seperti produksi vinil klorida dan industri klor-alkali berbasis sel merkuri. Namun demikian, di antara seluruh penggunaan yang disengaja, aktivitas pertambangan emas skala kecil tetap menjadi sumber emisi merkuri terbesar dan paling sulit dikendalikan, sehingga menimbulkan tantangan serius bagi perlindungan lingkungan dan kesehatan manusia (Dastoor et al., 2022).

c. Bentuk Merkuri

Merkuri merupakan logam yang terdapat secara alami di lingkungan dan hadir dalam beberapa bentuk kimia, yaitu merkuri elemental (logam), merkuri anorganik, dan merkuri organik:

1) Elemental (Hg^0)

Bentuk merkuri yang paling umum dijumpai di lingkungan adalah merkuri elemental atau merkuri unsur. Jenis merkuri ini memiliki sifat unik berupa wujud cair pada suhu kamar, berwarna keperakan, dan dikenal sebagai air raksa (Arianis, 2024). Merkuri elemental diperoleh melalui pengolahan bijih cinnabar dan memiliki sifat mudah terfragmentasi menjadi tetesan kecil yang cepat menguap pada suhu lingkungan. Uap merkuri yang dihasilkan bersifat tidak berwarna dan tidak berbau, sehingga berisiko tinggi terhirup tanpa disadari. Paparan merkuri elemental sangat berbahaya karena kemampuannya menembus sawar darah-otak dan plasenta, masuk ke dalam air susu ibu, serta bersifat neurotoksik kuat yang berdampak langsung pada sistem saraf pusat (Bagia et al., 2023).

2) Anorganik (Hg^+ dan Hg^{2+})

Merkuri anorganik merupakan bentuk merkuri yang berada sebagai ion Hg^+ dan Hg^{2+} , umumnya berwarna putih, kecuali mineral cinnabar yang berwarna merah. Senyawa merkuri anorganik banyak dijumpai dalam bentuk garam dan digunakan pada kegiatan laboratorium serta industri tertentu (Arianis, 2024). Pada masa lalu, merkuri anorganik juga dimanfaatkan dalam sabun dan krim pemutih kulit dengan konsentrasi sekitar 1–10% karena daya pemucatnya yang kuat, namun penggunaannya kini dilarang akibat tingkat toksisitas yang tinggi. Paparan akut merkuri anorganik dapat menyebabkan gangguan saluran pencernaan seperti muntah, nyeri abdomen, dan diare berdarah, disertai gangguan ginjal berupa albuminuria hingga anuria, serta ulserasi dan stomatitis. Sementara itu, paparan kronis berpotensi menimbulkan gangguan sistem saraf seperti tremor, rasa pahit di mulut, kerusakan gigi, anemia, serta kerusakan ginjal dan mukosa usus (Dewi, 2022).

3) Organik (Metilmerkuri)

Merkuri organik, terutama dalam bentuk metilmerkuri, merupakan spesies merkuri yang paling banyak dijumpai di lingkungan alami, khususnya pada organisme perairan seperti ikan. Senyawa ini terbentuk melalui proses biometilasi merkuri anorganik oleh aktivitas mikroorganisme, terutama bakteri, sehingga metilmerkuri mudah terakumulasi dalam rantai makanan perairan (Arianis, 2024).

1.5.2 Tinjauan Umum tentang Toksisitas Merkuri

Toksikologi merkuri dijelaskan melalui variasi bentuk kimianya Hg^0 , Hg^{2+} , dan merkuri organik seperti MeHg yang masing-masing memiliki toksisitas, bioavailabilitas, dan target organ yang berbeda. Secara molekuler, merkuri bersifat sangat reaktif terhadap gugus tiol dan selenol pada protein dan enzim, sehingga mengganggu fungsi sel melalui induksi stres oksidatif, pembentukan *Reactive Oxygen Species* (ROS), disfungsi mitokondria, serta gangguan homeostasis kalsium dan sinyal neurotransmitter. Metilmerkuri merupakan bentuk paling berbahaya karena mudah diserap melalui saluran cerna, mampu melintasi sawar darah-otak dan plasenta, serta terakumulasi di sistem saraf pusat dan jaringan janin, menyebabkan neurotoksisitas, gangguan perkembangan saraf, dan risiko kehamilan. Sementara itu, merkuri anorganik terutama terakumulasi di ginjal dan berhubungan dengan nefrotoksisitas, sedangkan paparan uap merkuri elemental dominan menyebabkan gangguan neurologis dan paru (Wu et al., 2024).

Otak tetap menjadi organ target merkuri. Selain itu, saraf, ginjal dan otot juga dapat terganggu fungsinya akibat merkuri. Logam ini dapat menyebabkan gangguan potensial membran dan memutus

homeostasis kalsium intraseluler. Hg berikatan ke thiol bebas yang ada ketika stabil. Uap merkuri dapat menyebabkan bronkitis, asma dan masalah pernapasan. sementara Hg berperan penting dalam kerusakan struktur protein tersier dan kuaterner. Selain itu, merkuri juga dapat mengubah fungsi seluler dengan melekat pada gugus selenohidril dan sulfhidril yang bereaksi dengan metil merkuri kemudian terjadi penghambatan struktur seluler. Logam ini juga terlibat dalam proses transkripsi dan translasi. Akibatnya, ribosom, retikulum endoplasma dan aktivitas sel pembunuh alami menghilang. Integritas seluler juga terpengaruh, berakibat pada pembentukan radikal bebas (Irianti et al., 2017).

1.5.3 Tinjauan Umum tentang Metil Merkuri

MeHg merupakan salah satu bentuk merkuri organik yang memiliki tingkat toksisitas sangat tinggi, afinitas ikatan yang kuat, serta kelarutan yang tinggi, khususnya di dalam tubuh organisme perairan. Karakteristik tersebut menyebabkan MeHg mudah terakumulasi dalam biota air dan selanjutnya berpotensi berpindah ke manusia melalui rantai makanan. Sifat bioakumulatif ini menjadikan metil-merkuri sebagai bentuk merkuri yang paling berbahaya, baik bagi kesehatan manusia maupun bagi keberlanjutan ekosistem perairan, terutama di wilayah yang terdampak aktivitas pertambangan emas (Amalia et al., 2024).

Secara kimia, metil-merkuri termasuk dalam kelompok senyawa alkil rantai pendek yang banyak dijumpai sebagai kontaminan logam di lingkungan. Proses pembentukan MeHg dapat terjadi melalui metilasi merkuri oleh berbagai organisme hidup, termasuk mikroorganisme dan manusia. Senyawa ini memiliki kemampuan untuk berikatan dengan komponen seluler, termasuk basa nitrogen seperti adenina, yang interaksinya dipengaruhi oleh kondisi pH lingkungan. Paparan metil-merkuri, khususnya dalam bentuk alkil rantai pendek, diketahui dapat menyebabkan degenerasi neuron pada korteks cerebri dan cerebellum. Kerusakan tersebut memunculkan berbagai gejala neurologis, antara lain parestesia distal, ataksia, disartria, gangguan pendengaran, serta penyempitan lapang pandang. Selain itu, metil-merkuri mampu menembus sawar plasenta dan terakumulasi dalam jaringan janin, sehingga meningkatkan risiko kematian intrauterin dan terjadinya gangguan neurologis berat seperti cerebral palsy (Sari, 2021).

Sebagai senyawa organik merkuri, MeHg memiliki daya serap yang sangat tinggi dalam tubuh manusia dan cenderung terdistribusi serta terakumulasi dalam berbagai jaringan. Paparan metil-merkuri dapat menimbulkan efek toksik multisistem, terutama pada sistem saraf, ginjal, dan sistem imun. Manifestasi klinis yang dilaporkan meliputi gangguan fungsi otak, kerusakan ginjal, perubahan pada DNA dan kromosom, gangguan sistem reproduksi, reaksi alergi, keguguran,

hingga terjadinya cacat bawaan pada bayi. Dalam konteks lingkungan, merkuri secara umum dapat ditemukan dalam berbagai bentuk kimia, seperti metalik, sulfida, dan klorida, yang kemudian dapat mengalami transformasi menjadi bentuk organik yang lebih toksik (Lobo et al., 2024).

Mekanisme toksisitas metil-merkuri terutama berkaitan dengan afinitasnya yang tinggi terhadap gugus sulfurhidril (-SH) pada protein dan enzim. Ikatan ini menyebabkan gangguan pada fungsi enzim penting, termasuk enzim asetil transferase yang berperan dalam pembentukan neurotransmitter asetilkolin. Inhibisi enzim tersebut mengakibatkan defisiensi asetilkolin, yang secara klinis ditandai dengan gangguan fungsi motorik dan neuromuskular. Di dalam tubuh manusia, MeHg diekskresikan terutama melalui feses dan memiliki waktu paruh biologis sekitar 65 hari, yang mencerminkan sifat akumulatif dan persistensi senyawa ini, sehingga paparan berulang meskipun dalam jumlah kecil tetap berpotensi menimbulkan dampak kesehatan yang signifikan (Susanti, 2022).

Metil-merkuri merupakan bentuk dominan merkuri dalam ikan dan seafood, dengan proporsi sekitar 95% dari merkuri total yang terakumulasi dalam jaringan ikan. Mengingat konsumsi ikan merupakan jalur utama pajanan merkuri pada manusia, maka paparan merkuri pada manusia umumnya didominasi oleh metil-merkuri (Ahmad et al., 2022). Sejalan dengan hal tersebut, *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* (ATSDR) menyatakan bahwa setelah masuk ke dalam tubuh melalui konsumsi makanan yang mengandung metil-merkuri, sebagian besar merkuri yang terakumulasi dalam darah manusia berada dalam bentuk metil-merkuri, di mana lebih dari 90% merkuri total dalam darah terutama terikat pada eritrosit sebagai metil-merkuri.

Setelah diserap ke dalam tubuh, sebagian kecil metil-merkuri (MeHg) dapat mengalami proses demetilasi menjadi merkuri anorganik (Hg^{2+}). Proses demetilasi ini terutama terjadi di jaringan seperti hati dan ginjal, dan diduga melibatkan aktivitas enzimatik serta peran mikroorganisme. Namun, proses demetilasi berlangsung relatif lambat, sehingga metil-merkuri tetap menjadi bentuk dominan merkuri dalam sirkulasi darah selama periode tertentu. Kondisi ini menjelaskan mengapa lebih dari 90% merkuri yang terdeteksi dalam darah manusia masih berada dalam bentuk metil-merkuri, meskipun proses demetilasi memang terjadi di dalam tubuh (ATSDR, 2024).

1.5.4 Tinjauan Umum tentang Jalur Pajanan dalam Tubuh

Jalur pajanan didefinisikan sebagai rute atau mekanisme masuknya agen bahaya dari lingkungan ke dalam tubuh manusia. Identifikasi jalur pajanan merupakan tahap krusial dalam penilaian risiko kesehatan karena menentukan sejauh mana individu atau kelompok populasi dapat terpapar suatu zat berbahaya. Pemahaman yang baik

mengenai jalur pajanan memungkinkan estimasi tingkat risiko kesehatan secara lebih akurat serta menjadi dasar dalam penetapan strategi pencegahan dan pengendalian yang tepat (Rachmat et al., 2025).

Secara umum, merkuri dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui tiga jalur utama, yaitu saluran pernapasan, saluran pencernaan, dan kontak kulit. Di antara ketiga jalur tersebut, saluran pernapasan dan kontak kulit merupakan rute pajanan yang paling relevan dalam konteks aktivitas sehari-hari maupun pekerjaan. Paparan melalui kulit, misalnya, dapat terjadi saat seseorang menggunakan produk kosmetik yang mengandung merkuri, sehingga memungkinkan senyawa tersebut terserap secara langsung ke dalam tubuh (Azzahra et al., 2021).

Hg paling banyak masuk ke dalam tubuh melalui paru-paru dalam bentuk uap atau partikel debu, dengan sekitar 80% uap merkuri yang terhirup dapat diabsorpsi. Sebaliknya, merkuri logam yang tertelan melalui saluran pencernaan umumnya hanya diserap dalam jumlah kecil sehingga sering dianggap dapat diabaikan, sementara senyawa merkuri yang larut dalam air lebih mudah diserap. Beberapa bentuk merkuri organik dan anorganik juga diketahui dapat diabsorpsi melalui kulit dan rambut (Rahmadani et al., 2025).

Pada ibu hamil, jalur pajanan MeHg memiliki implikasi yang lebih serius karena kemampuan senyawa ini untuk menembus sawar plasenta dan terakumulasi dalam jaringan janin. Konsentrasi metilmerkuri dalam darah tali pusat sering kali dilaporkan lebih tinggi dibandingkan darah ibu, yang mencerminkan adanya transfer aktif dan efisiensi distribusi ke janin. Jalur pajanan prenatal ini merupakan jalur paling berbahaya karena terjadi pada periode kritis perkembangan sistem saraf, sehingga secara signifikan meningkatkan risiko gangguan neurodevelopmental jangka panjang pada anak (Meira et al., 2025).

1.5.5 Tinjauan Umum tentang Ibu Hamil

a. Definisi Ibu Hamil

Kehamilan merupakan periode yang dimulai sejak terjadinya konsepsi hingga kelahiran janin. Lama kehamilan normal berlangsung sekitar 280 hari atau 40 minggu, yang setara dengan 9 bulan 7 hari. Secara klinis, masa kehamilan dibagi ke dalam tiga trimester, yaitu trimester pertama yang berlangsung dari konsepsi hingga usia kehamilan 3 bulan, trimester kedua yang berlangsung dari bulan keempat hingga bulan keenam, dan trimester ketiga yang berlangsung dari bulan ketujuh hingga bulan kesembilan kehamilan (Retnaningtyas et al., 2022).

Sebagai suatu proses fisiologis, kehamilan menimbulkan berbagai perubahan mendasar pada tubuh ibu untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangan janin di dalam rahim. Perubahan tersebut mencakup penyesuaian pada berbagai sistem tubuh, baik

secara anatomi maupun fisiologi, yang memungkinkan kehamilan dapat berlangsung secara normal. Meskipun kehamilan, persalinan, dan kelahiran pada dasarnya merupakan proses alami, berbagai penyulit dapat muncul sewaktu-waktu dan berpotensi menimbulkan dampak serius terhadap kesehatan ibu maupun janin. Dalam kondisi tertentu, kehamilan dapat dikategorikan sebagai kehamilan risiko tinggi apabila terdapat faktor fisiologis atau psikologis yang secara signifikan meningkatkan risiko morbiditas atau mortalitas ibu dan janin (Wati et al., 2023).

Menurut Badan Kependudukan dan Keluarga Berencana Nasional (BKKBN), kehamilan terjadi melalui proses pertemuan antara sel telur yang telah matang dengan sperma, yang kemudian membentuk sel baru yang akan berkembang menjadi janin. Proses ini melibatkan berbagai sistem dalam tubuh wanita, terutama sistem hormonal. Hormon estrogen dan progesteron memiliki peran utama dalam mempertahankan kehamilan, karena kadar kedua hormon tersebut meningkat selama masa kehamilan dan memengaruhi proses adaptasi fisiologis ibu hamil. Oleh karena itu, kesiapan fisik dan mental ibu menjadi faktor penting yang turut menentukan keberhasilan adaptasi tubuh selama kehamilan (Mu'alimah et al., 2022).

b. Periode Kehamilan

Kehamilan secara klinis diklasifikasikan ke dalam tiga trimester. Trimester pertama berlangsung selama 12 minggu awal kehamilan, trimester kedua dimulai pada minggu ke-13 hingga minggu ke-27, dan trimester ketiga berlangsung dari minggu ke-28 hingga minggu ke-40 (Said et al., 2022).

1. Trimester pertama

Tubuh ibu hamil mengalami berbagai perubahan fisik sebagai respons terhadap peningkatan hormon dan awal pertumbuhan janin. Perubahan ini telah dimulai sejak awal kehamilan dan akan terus berlangsung hingga mendekati persalinan. Pada wanita yang sehat, perubahan tersebut umumnya dapat ditoleransi dengan baik, namun pada kondisi tertentu dapat memperburuk atau memunculkan penyakit yang telah ada sebelumnya. Perubahan fisik yang sering terjadi pada trimester pertama meliputi pembesaran payudara, peningkatan frekuensi buang air kecil, mual dan muntah, konstipasi, mudah lelah, sakit kepala, kram perut, serta peningkatan berat badan. Ketidaknyamanan lain yang sering dirasakan ibu hamil pada fase ini antara lain ngidam, keputihan, dan rasa enek, yang umumnya berkaitan dengan peningkatan kadar hormon estrogen. Mual dan muntah

merupakan keluhan yang paling sering dialami, terutama pada bulan-bulan awal kehamilan (Yuliana et al., 2024).

2. Trimester kedua

Trimester kedua merupakan periode kehamilan yang berlangsung antara minggu ke-13 hingga sekitar minggu ke-28 dan sering disebut sebagai masa stabilitas kehamilan. Pada fase ini, kondisi ibu umumnya mulai lebih nyaman dibandingkan trimester pertama, sehingga ibu dan pasangan memiliki kesempatan untuk menyesuaikan diri dan mempersiapkan peran sebagai orang tua. Beberapa perubahan fisik mulai tampak, seperti perubahan pigmentasi kulit, penggelapan puting susu dan area sekitarnya, serta munculnya garis hitam pada perut (linea nigra) yang dapat terlihat hingga area pusar. Sekitar usia kehamilan 18 minggu, perut ibu mulai tampak membesar dan membulat seiring dengan perkembangan janin. Perubahan bentuk tubuh ini dapat menimbulkan ketidaknyamanan psikologis, sehingga diperlukan dukungan dan pengertian dari pasangan (Maayah et al., 2023).

3. Trimester ketiga

Trimester ketiga secara khusus merupakan fase akhir kehamilan yang berlangsung dari sekitar minggu ke-27 hingga kehamilan mencapai cukup bulan pada minggu ke-38 hingga ke-40. Pada tahap ini, ketidaknyamanan fisik semakin sering dirasakan oleh ibu hamil. Gejala seperti dispnea, peningkatan frekuensi berkemih, konstipasi, varises, serta nyeri punggung merupakan keluhan yang umum terjadi. Aktivitas janin yang semakin kuat juga sering kali mengganggu kenyamanan dan kualitas tidur ibu (Andriani et al., 2023). Pada minggu-minggu terakhir kehamilan, sebagian ibu hamil mulai merasakan kontraksi *Braxton Hicks*, yaitu kontraksi ringan atau rasa mengeras pada rahim yang menyerupai tanda-tanda persalinan. Kontraksi ini umumnya berlangsung singkat, sekitar 30 detik, dan sering kali tidak disadari. Ketika kepala janin mulai turun ke dalam panggul sekitar usia kehamilan 36 minggu, ibu biasanya merasa lebih nyaman dan pernapasan menjadi lebih lega (Maayah et al., 2023).

c. Usia Kehamilan

Usia didefinisikan sebagai lamanya seseorang hidup sejak dilahirkan hingga waktu tertentu. Faktor usia merupakan salah satu determinan penting dalam kehamilan, khususnya dalam kesiapan menghadapi persalinan. Ibu hamil pada usia yang lebih muda cenderung memiliki tingkat kesiapan dan pengalaman yang lebih rendah, baik secara fisik maupun psikologis, sehingga dapat

memengaruhi perhatian dan kesiapan dalam menjalani proses persalinan. Ketidaksiapan tersebut sering dikaitkan dengan keterbatasan pemahaman serta pengalaman dalam menerima dan menjalani kehamilan (Fauziah & Rahmawati, 2021).

1. Usia kurang dari 20 tahun

Kehamilan pada wanita berusia kurang dari 20 tahun berisiko terhadap kesehatan ibu dan perkembangan janin karena organ reproduksi yang belum matang secara optimal. Selain itu, ketidakstabilan kontrol emosional dan kondisi psikologis pada kelompok usia ini dapat meningkatkan risiko terjadinya komplikasi kehamilan, termasuk keguguran atau abortus (Hartono, 2022).

2. Usia 20 sampai 35 tahun

Rentang usia 20 hingga 35 tahun dianggap sebagai periode paling optimal untuk kehamilan. Pada usia ini, kesiapan organ reproduksi secara anatomis dan fisiologis telah berkembang dengan baik, disertai kematangan psikologis, emosional, serta kondisi sosial ekonomi dan tingkat pendidikan yang relatif lebih stabil, sehingga mendukung keberlangsungan kehamilan yang sehat (Hartono, 2022).

3. Usia lebih dari 35 tahun

Kehamilan pada usia di atas 35 tahun dikategorikan sebagai kehamilan berisiko tinggi. Pada kelompok usia ini, kemungkinan terjadinya komplikasi kehamilan meningkat, baik akibat penurunan fungsi organ reproduksi maupun adanya penyakit penyerta yang berkaitan dengan usia. Kondisi tersebut dapat membahayakan ibu dan janin, seperti meningkatnya kebutuhan persalinan dengan tindakan bedah sesar, risiko penyakit metabolik, serta kemungkinan terjadinya kelainan kromosom pada janin (Hartono, 2022).

1.5.6 Tinjauan Umum tentang Dampak MeHg pada Ibu Hamil

Hg merupakan logam berat yang memiliki tingkat toksisitas dan volatilitas yang tinggi serta kemampuan bioakumulasi yang kuat. Hg yang mengalami proses metilasi memiliki afinitas yang tinggi terhadap jaringan lemak dalam organisme hidup, sehingga mudah terakumulasi dan mengalami biomagnifikasi di sepanjang rantai makanan hingga mencapai tingkat yang lebih toksik pada organisme tingkat trofik yang lebih tinggi. Secara fisik, merkuri merupakan satu-satunya logam yang berada dalam bentuk cair pada suhu ruang. Hg, baik dalam bentuk logam maupun metil-merkuri (CH_3Hg^+), umumnya masuk ke dalam tubuh manusia melalui jalur pencernaan dan pernapasan. Meskipun sebagian merkuri logam dapat diekskresikan, sisa merkuri yang tidak tereliminasi akan terakumulasi terutama di ginjal dan sistem saraf, yang

dalam jangka panjang dapat menimbulkan gangguan kesehatan apabila akumulasinya terus meningkat (Tadeus et al., 2022).

Paparan Hg, khususnya dalam bentuk MeHg, telah dikaitkan dengan berbagai dampak kesehatan yang serius, terutama pada kehamilan dan perkembangan janin. Paparan MeHg diketahui dapat meningkatkan risiko kelainan kongenital, kematian saat lahir, serta menyebabkan kondisi neurologis berat seperti Fetal Minamata Disease, sebagaimana pernah terjadi pada komunitas nelayan di Teluk Minamata, Jepang. Selain itu, merkuri juga dapat menimbulkan kerusakan otak, gangguan saraf motorik, *cerebral palsy*, dan retardasi mental. Dalam konteks paparan di tempat kerja, paparan merkuri anorganik pada pria dapat menyebabkan gangguan fungsi reproduksi seperti impotensi dan penurunan libido, sedangkan pada wanita dapat memicu gangguan siklus menstruasi (Widianti et al., 2024).

MeHg merupakan bentuk merkuri yang paling sering ditemukan pada ikan yang terkontaminasi dan menjadi sumber utama paparan pada manusia melalui konsumsi ikan. Akumulasi metil-merkuri dalam tubuh manusia dapat menyebabkan kerusakan sistem saraf, mengganggu pertumbuhan dan perkembangan janin, serta menurunkan kualitas air susu ibu. Oleh karena itu, wanita hamil dan ibu menyusui perlu menyadari potensi risiko paparan metil-merkuri dan merkuri anorganik serta melakukan langkah-langkah pencegahan untuk mengurangi paparan, seperti memilih jenis ikan dengan kandungan merkuri rendah, menghindari kebiasaan merokok maupun paparan asap rokok pasif, serta mengikuti rekomendasi dari tenaga kesehatan dan lembaga kesehatan masyarakat (Nuraini et al., 2023).

Paparan Hg pada ibu hamil menimbulkan risiko serius terhadap kesehatan ibu dan janin. MeHg yang masuk ke dalam tubuh ibu memiliki kemampuan tinggi untuk menembus sawar darah plasenta, kemudian terdistribusi melalui peredaran darah dan berikatan dengan hemoglobin di dalam eritrosit. Akibat keterbatasan kemampuan janin dalam melakukan ekskresi logam berat, konsentrasi merkuri dalam darah janin umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan kadar dalam darah ibu. Paparan MeHg selama kehamilan juga berhubungan erat dengan efek fetotoksik, yang dapat menyebabkan berbagai gangguan kehamilan, seperti keguguran, kelahiran mati, berat badan lahir rendah, serta terjadinya aborsi spontan (Novo et al., 2021).

1.5.7 Tinjauan Umum tentang Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan

Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) merupakan proses karakterisasi terhadap potensi dampak kesehatan yang merugikan akibat paparan bahaya lingkungan, dengan mempertimbangkan sifat intrinsik agen pencemar serta karakteristik spesifik dari sistem sasaran. ARKL berfungsi sebagai salah satu instrumen dalam pengelolaan risiko yang digunakan untuk melindungi

kesehatan masyarakat dari dampak lingkungan yang tidak sehat. Pendekatan ini bertujuan untuk menghitung dan memperkirakan risiko kesehatan pada manusia, termasuk mengidentifikasi faktor-faktor ketidakpastian, menelusuri sumber dan jalur paparan tertentu, serta memperhitungkan karakteristik agen yang menjadi fokus penilaian dan karakteristik populasi sasaran secara spesifik (Maherdyta et al., 2022).

a. EDI_{Blood}

Estimated Daily Intake (EDI) merupakan perkiraan jumlah logam berat yang masuk ke dalam tubuh manusia setiap hari melalui konsumsi makanan. Penentuan nilai EDI didasarkan pada tingkat konsumsi pangan (g/hari), seperti kerang, serta konsentrasi logam berat yang terkandung di dalamnya. Nilai ini dapat berbeda pada setiap individu karena dipengaruhi oleh berat badan. Selanjutnya, nilai EDI dibandingkan dengan batas aman seperti PMTDI (*Provisional Maximum Tolerable Daily Intake*) atau Reference Dose (RfD), yaitu nilai maksimum paparan harian suatu zat kimia yang diperkirakan tidak menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia (Satriawan et al., 2021).

Dalam pendekatan EDI berbasis biomarker darah (EDI-blood), perhitungan EDI tidak menggunakan data konsumsi makanan, seperti Food Frequency Questionnaire (FFQ) atau recall, melainkan diturunkan dari konsentrasi biomarker dalam darah. Pendekatan ini memungkinkan estimasi paparan yang lebih akurat karena mencerminkan dosis internal yang telah melalui proses biologis dalam tubuh, sehingga lebih representatif dalam menilai tingkat paparan aktual pada individu (Liang et al., 2013). Adapun perhitungannya:

$$EDI_{\text{Blood}} = \frac{c \times v \times b}{A \times f \times bw}$$

Keterangan:

c: estimasi MeHg dalam darah ($\mu\text{g/kg}$) = 90% Hg dalam darah (ATSDR, 2024)

b: konstanta eliminasi sebesar $0,014 \text{ hari}^{-1}$

v: volume darah dalam tubuh (mL)

A: faktor penyerapan sebesar 0,95

f: fraksi dosis serap yang diserap oleh darah sebesar 0,059

bw: berat badan (kg)

b. *Margin of Exposure* (MoE)

MoE merupakan rasio yang diperoleh dengan membandingkan titik referensi (*reference point*), seperti *Benchmark Dose Lower Confidence Limit* (BMDL) yang berasal dari studi toksikologi (umumnya pada hewan uji), dengan estimasi paparan pada manusia. Nilai MoE digunakan untuk menilai tingkat

keamanan suatu paparan, di mana semakin besar nilai MoE menunjukkan jarak yang lebih lebar antara dosis yang menimbulkan efek dengan paparan aktual pada manusia, sehingga risiko kesehatan cenderung lebih rendah (Bennekou et al., 2025). Adapun Perhitungannya:

$$\text{MoE} = \frac{\text{BMDL}}{\text{EDI}}$$

Keterangan:

MoE (*Margin of Exposure*): Rasio untuk menilai tingkat keamanan paparan

BMDL (*Benchmark Dose Lower Confidence Limit*): Batas dosis terendah yang masih dianggap aman

EDI (*Estimated Daily Intake*): Estimasi asupan harian Hg ($\mu\text{g/kg}$ berat badan/hari)

c. *Risk Quotient* (RQ)

Risk Quotient (RQ) merupakan indikator yang digunakan untuk menilai tingkat bahaya akibat paparan zat berisiko pada responden. Nilai RQ diperoleh dengan membandingkan jumlah zat berbahaya yang masuk ke dalam tubuh (*intake*) dengan dosis acuan yang dianggap aman, yaitu *Reference Dose* (RfD). Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk mengetahui sejauh mana paparan yang terjadi masih berada dalam batas aman bagi kesehatan manusia (Suryadwanti et al., 2024).

Penentuan karakteristik risiko dilakukan dengan menghitung perbandingan antara nilai *intake* (I) dan RfD. Nilai *intake* diperoleh dari hasil analisis pajanan sebelumnya, sedangkan RfD berasal dari kajian dosis–respon yang mengacu pada literatur ilmiah. Proses ini bertujuan untuk mengidentifikasi tingkat risiko serta menentukan apakah dosis atau konsentrasi tertentu dari suatu agen berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan pada masyarakat (Susanto et al., 2025).

RQ merupakan tahap akhir dalam analisis risiko kesehatan lingkungan yang digunakan untuk memperkirakan besarnya risiko yang mungkin terjadi. Interpretasi nilai RQ dapat menunjukkan potensi dampak baik nonkarsinogenik maupun karsinogenik, di mana nilai RQ lebih dari 1 mengindikasikan perlunya upaya pengendalian. Sementara itu, untuk menilai risiko karsinogenik secara lebih spesifik, digunakan parameter *Excess Cancer Risk* (ECR) sebagai bagian dari penilaian karakteristik risiko (Meirindany & Dalimunthe, 2023)

$$RQ = \frac{EDI}{RfD}$$

Keterangan:

RQ (*Risk Quotient*): Indikator toksikologi untuk menilai potensi risiko kesehatan

EDI (*Estimated Daily Intake*): Estimasi asupan harian Hg ($\mu\text{g/kg}$ berat badan/hari)

RfD (*Reference Dose*): Dosis rujukan yang dianggap aman ($\mu\text{g/kg}$ berat badan/hari)

1.6 Sintesa Penelitian

Berikut merupakan tabel sintesa Analisis Risiko Analisis Risiko Kesehatan Ibu Hamil Akibat Paparan Merkuri (Hg) di Kota Makassar sebagai mana pada tabel 1.1 sebagai berikut:

Tabel 1.1 Tabel Sintesa Analisis Risiko Analisis Risiko Kesehatan Ibu Hamil Akibat Paparan Merkuri (Hg) di Kota Makassar

No	Peneliti (Tahun) dan Sumber Jurnal	Judul dan Nama Jurnal	Desain Penelitian dan Metode Analisis	Sampel	Temuan
1	Novo., et al. (2021) https://doi.org/10.3390/ijms-22063101	Cellular and molecular mechanisms mediating methylmercury neurotoxicity and neuroinflammation	Literature review; analisis deskriptif kualitatif (sintesis berbagai studi)	Studi in vitro, in vivo, dan manusia dari penelitian terdahulu	MeHg menyebabkan neurotoksisitas melalui stres oksidatif, disfungsi mitokondria, gangguan Ca^{2+} , eksitotoksisitas, neuroinflamasi, dan kematian sel; berdampak pada sistem saraf pusat
2	Rahayu, D. R., & Mangkoedihardjo, S. (2022)	Kajian Bioaugmentasi untuk Menurunkan Konsentrasi Logam Berat di Wilayah Perairan	Studi literatur dengan studi kasus; analisis deskriptif	Literatur terkait dan studi kasus pencemaran Hg di Sungai	Bioaugmentasi dengan konsorsium bakteri (<i>Pseudomonas putida</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>Citrobacter</i>

No	Peneliti (Tahun) dan Sumber Jurnal	Judul dan Nama Jurnal	Desain Penelitian dan Metode Analisis	Sampel	Temuan
	https://doi.org/10.12962/j23373539.v11i1.82791	Menggunakan Bakteri (Studi Kasus: Pencemaran Merkuri di Sungai Krueng Sabee, Aceh Jaya)		Krueng Sabee	freundii terbukti efektif dalam menurunkan konsentrasi merkuri di perairan hingga $\pm 99\%$ dari 0,76 mg/kg menjadi 0,0076 mg/kg dalam 81 hari
3	Ahmad., et al. (2022) https://doi.org/10.1007/s11356-021-17483-6	Exposure Assessment of methyl mercury from consumption of fish and seafood in Peninsular Malaysia	Penelitian kuantitatif (cross-sectional); analisis statistik (uji chi-square, perhitungan EWI & HQ)	67 spesies ikan & seafood serta responden berdasarkan demografi	Kadar MeHg bervariasi (0,013–0,252 mg/kg); konsumsi ikan memengaruhi paparan; beberapa kelompok (remaja & lansia) memiliki risiko kesehatan (HQ>1)
4	Nuraini., et al. (2023) https://doi.org/10.54371/jiip.v6i5.1967	Transport Metilmerkuri (MeHg) dan Merkuri Inorganik (I-Hg) terhadap Perkembangan Otak Janin dan Kualitas ASI	Studi literatur; analisis deskriptif	Literatur terkait MeHg, kehamilan dan ASI	MeHg bersifat neurotoksik, dapat menembus plasenta, memengaruhi perkembangan otak janin, dan terdapat dalam ASI meskipun kadar rendah
5	Abedinlah., et al. (2021)	Methylmercury detection in maternal blood	Penelitian laboratorium (eksperimen)	Sampel darah Ibu Hamil	Metode LC-ICP-MS mampu mendeteksi metil-merkuri

No	Peneliti (Tahun) dan Sumber Jurnal	Judul dan Nama Jurnal	Desain Penelitian dan Metode Analisis	Sampel	Temuan
	https://doi.org/10.47836/pjst.29.3.45	samples by liquid chromatography with inductively coupled plasma mass spectrometry	ntal); analisis LC-ICP-MS		secara spesifik dan akurat dalam darah ibu hamil, sehingga darah valid digunakan sebagai biomarker paparan MeHg
6	Wickliffe., et al. (2021) https://doi.org/10.1038/s41370-020-0233-3	Exposure to total and methylmercury among pregnant women in Suriname: sources and public health implications	Studi observasional; analisis korelasi	Ibu hamil (sampel darah & rambut)	Kadar merkuri total dalam darah berkorelasi kuat dengan metil-merkuri, menunjukkan konsumsi ikan sebagai sumber utama paparan dan mendukung penggunaan darah sebagai indikator paparan MeHg
7	Wells., et al. (2022) https://doi.org/10.1007/s12011-021-02968-9	Total Blood Mercury Predicts Methylmercury Exposure in Fish and Shellfish Consumers	Studi kuantitatif; analisis regresi & model spline	Data NHANES	Kadar merkuri total dalam darah merupakan prediktor yang sangat kuat untuk paparan metil-merkuri. Rata-rata rasio MeHg terhadap THg sekitar 0,75 dan meningkat seiring kenaikan kadar THg,

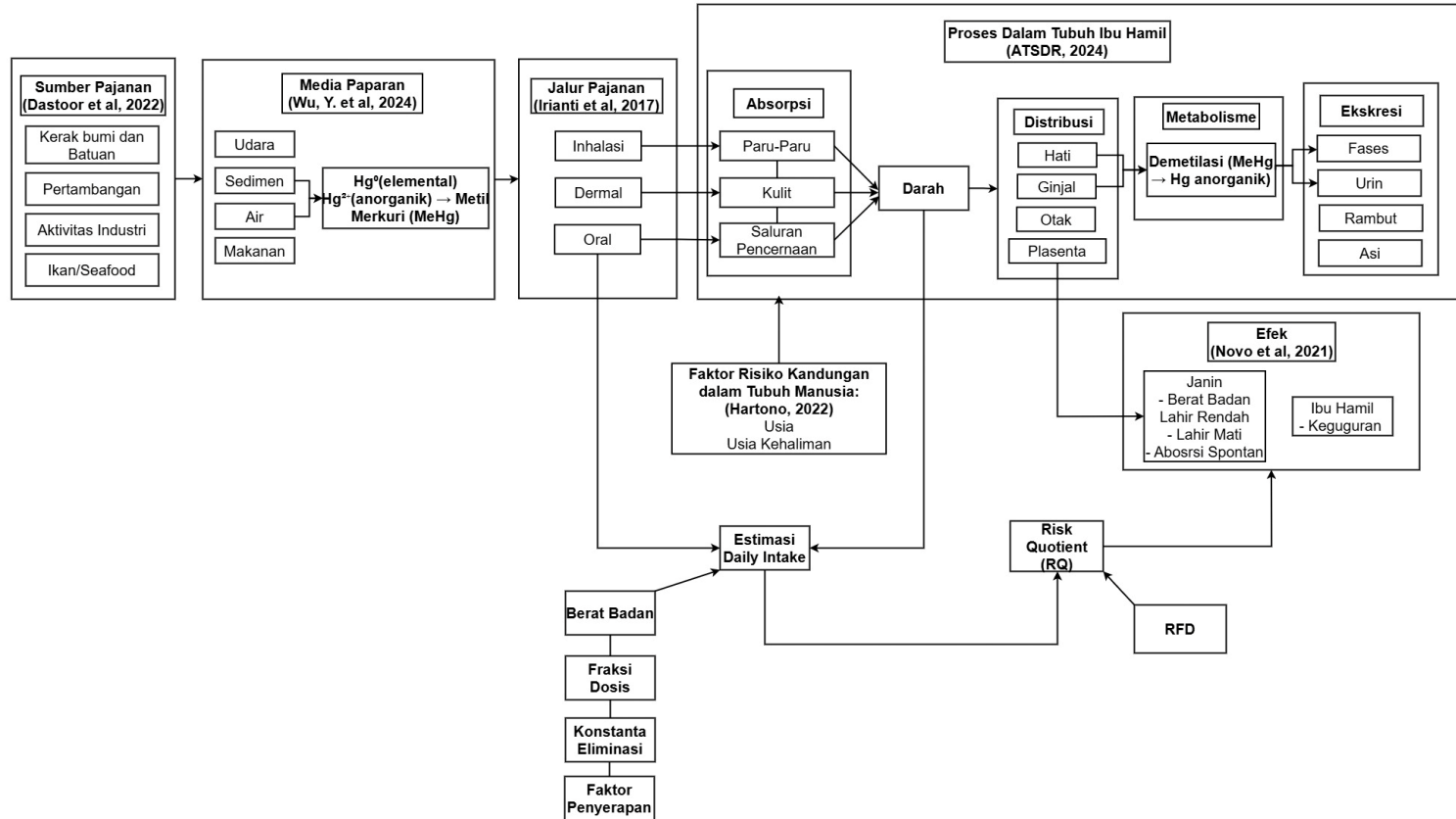
No	Peneliti (Tahun) dan Sumber Jurnal	Judul dan Nama Jurnal	Desain Penelitian dan Metode Analisis	Sampel	Temuan
					dengan model statistik menunjukkan kecocokan yang sangat tinggi ($R^2 > 0,95$)
8	Santonen., et al. (2023) https://doi.org/10.1016/j.jijheh.2023.114139	How to use human biomonitoring in chemical risk assessment: Methodological aspects, recommendations, and lessons learned from HBM4EU	Studi deskriptif (data sekunder) dengan pendekatan RA & EBoD (MoE, HQ/RCR, HI)	Data biomonitoring populasi Eropa usia subur, dan pekerja)	HBM memberikan estimasi paparan internal yang lebih akurat dibandingkan pendekatan berbasis lingkungan serta membantu mengidentifikasi kelompok berisiko dengan lebih tepat.
9	Liang., et al. (2013) https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.049	Plasma mercury levels in Hong Kong residents: In relation to fish consumption	Studi observasional; analisis korelasi	151 sampel plasma manusia	Kadar merkuri plasma berhubungan signifikan dengan konsumsi ikan dan dapat digunakan untuk mengestimasi asupan harian (EDI) metil-merkuri berbasis darah
10	Ekawati & Priyambodo. (2020)	Intoksikasi merkuri: faktor risiko, patofisiologi	Studi literatur; analisis deskriptif	Literatur terkait paparan merkuri	Paparan merkuri pada ibu hamil meningkatkan risiko gangguan

No	Peneliti (Tahun) dan Sumber Jurnal	Judul dan Nama Jurnal	Desain Penelitian dan Metode Analisis	Sampel	Temuan
	https://doi.org/10.29303/jk.v9i2.4356	dan dampaknya bagi wanita hamil di daerah lingkaran tambang			kesehatan, terutama pada janin, seperti gangguan neurologis, kelainan kongenital, hingga kematian janin, dengan faktor risiko utama berasal dari paparan lingkungan tambang dan konsumsi pangan terkontaminasi

Darah ibu hamil merupakan indikator biologis yang akurat dan sensitif dalam menilai tingkat paparan MeHg. Hal ini karena konsentrasi merkuri dalam darah berkaitan erat dengan pola konsumsi ikan yang menjadi sumber utama paparan MeHg. Selain itu, penerapan pendekatan *human biomonitoring* yang dipadukan dengan analisis risiko kesehatan, seperti perhitungan EDI dan HQ, dapat memberikan estimasi risiko yang lebih merepresentasikan kondisi biologis aktual dibandingkan dengan penilaian risiko yang hanya mengandalkan data lingkungan

1.7 Kerangka Teori

Berdasarkan tinjauan umum yang telah dihadirkan, maka terdapat kerangka teori sebagai berikut:



Gambar 1.1 Kerangka Teori Analisis Risiko Kesehatan Ibu Hamil Akibat Paparan Merkuri (Hg)

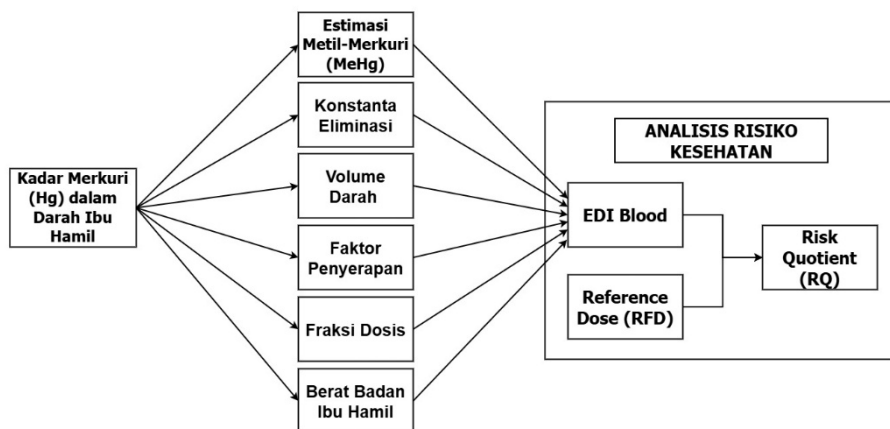
1.8 Dasar Pemikiran Variabel Yang Diteliti

Merkuri merupakan salah satu logam berat yang berbahaya karena bersifat sangat toksik, bahkan pada paparan dalam jumlah kecil. Paparan merkuri dapat menyebabkan gangguan fungsi organ, terutama ginjal dan hati. Pada ibu hamil, merkuri memiliki dampak yang jauh lebih serius karena dapat ditransfer ke janin melalui plasenta. Paparan tersebut berpotensi menyebabkan kerusakan organ janin, gangguan perkembangan mental, keterbelakangan, hingga kematian dalam kandungan (Masruddin & Mulasari, 2021).

Dalam lingkungan perairan, merkuri (Hg) yang masuk akan diabsorpsi dan dimetabolisme oleh mikroorganisme melalui proses metilasi, sehingga menghasilkan MeHg yang memiliki tingkat toksisitas lebih tinggi. Dalam penelitian ini, kadar Hg yang terukur dalam darah ibu hamil selanjutnya dikonversi menjadi kadar MeHg. Oleh karena itu, estimasi kadar MeHg dalam darah dapat dimanfaatkan sebagai dasar untuk menilai pajanan metil-merkuri secara lebih spesifik dan relevan terhadap risiko kesehatan (Ibrahim & Aris, 2020).

Penilaian risiko kesehatan dilakukan melalui perhitungan asupan, yaitu jumlah zat yang masuk ke dalam tubuh per satuan berat badan per hari. Proses penetapan nilai kuantitatif toksisitas suatu agen risiko dikenal sebagai analisis dosis–respon (*dose–response assessment* atau *toxicity assessment*). Tingkat toksisitas untuk efek nonkarsinogenik dinyatakan dalam bentuk dosis referensi (Sitoresmi, 2021). Tahap akhir dalam analisis risiko kesehatan lingkungan dilakukan dengan menghitung RQ, yaitu perbandingan antara nilai EDI dengan RfD. Perhitungan karakteristik risiko ini dilakukan dengan membagi nilai asupan terhadap dosis atau konsentrasi referensi dari agen risiko yang dinilai (Susanto et al., 2025).

Berdasarkan dasar pemikiran variabel maka kerangka konsep penelitian ini adalah sebagai berikut:

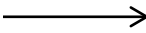


Gambar 1.2 Kerangka Konsep Analisis Risiko Kesehatan Ibu Hamil Akibat Pajanan Merkuri (Hg)

Keterangan :

EDI Blood : Estimasi *Daily Intake* dari Darah

 : Variabel

 : Arah Hubung

1.9 Definisi Operasional dan Kriteria Objektif

Di bawah ini merupakan tabel definisi operasional dan kriteria objektif yang disajikan pada tabel 1.2

Tabel 1.2 Definisi Operasional dan Kriteria Objektif Analisis Risiko Kesehatan Ibu Hamil Akibat Paparan Merkuri (Hg)

No	Variabel	Definisi Operasional	Alat Ukur	Kriteria Objektif	Skala Pengukuran
1	Merkuri	Konsentrasi Merkuri yang ada di dalam darah ibu hamil yang di ukur	Data Sekunder	-	Rasio
2	Metil Merkuri	Estimasi kadar metil merkuri pada ibu yang dihitung dari kadar merkuri dalam darah	-	-	Rasio
3	Konstanta Eliminasi	Laju eliminasi metil-merkuri dari tubuh per satuan waktu	Studi literatur (U.S. EPA, 2001)	0,014 Hari ⁻¹	Rasio
4	Volume Darah	Estimasi volume darah dalam tubuh ibu hamil	Menggunakan Rumus $\text{Volume Darah} = \frac{70}{[\sqrt{(BMI+22)}]}$ (Kennedy et al., 2022)	-	Rasio
5	Faktor Penyerapan	Proporsi MeHg yang diserap dari paparan ke dalam tubuh	Studi literatur (U.S. EPA, 2001)	0.95	Rasio

6	Fraksi Dosis yang diserap Oleh Darah	Fraksi dosis MeHg yang terdistribusi ke dalam darah	Studi literatur (U.S. EPA, 2001)	0.059	Rasio
7	Berat Badan	Berat badan ibu hamil saat pengambilan sampel	Data Sekunder	-	Rasio
8	EDl _{Blood}	Estimasi konsentrasi Metil Merkuri (MeHg) yang masuk dalam darah	Menggunakan Rumus $EDl_{Blood} = \frac{c \times v \times b}{A \times f \times bw}$ (Liang et al., 2013)	-	Rasio
9	<i>Reference Dose</i> (RfD)	Nilai dosis pajanan harian metil-merkuri yang dianggap aman untuk paparan kronis yang ditetapkan oleh <i>United States Environmental Protection Agency</i> (USEPA)	Studi literatur (U.S. EPA, 2001)	1×10^{-4} mg/kg/hari atau 0,1 µg/kg/hari (U.S. EPA, 2001)	Rasio
10	<i>Margin of Exposure</i> (MoE)	Tingkat risiko kesehatan akibat pajanan metil-merkuri pada ibu hamil	Menggunakan rumus $MoE = \frac{BMDL}{EDI}$ (Amqam et al., 2025)	Aman jika MoE>10, Tidak Aman jika MoE<10 (U.S. EPA, 2001)	Nominal
11	<i>Risk Quotient</i> (RQ)	Tingkat risiko kesehatan akibat	Menggunakan rumus	Berisiko jika RQ>1,	Nominal

		pajanan metil-merkuri pada ibu hamil	$RQ = \frac{EDI}{RFD}$	Tidak Berisiko jika $RQ < 1$	
--	--	--------------------------------------	------------------------	------------------------------	--

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan desain potong lintang (*cross-sectional*) yang menggunakan metode studi dokumentasi, dengan memanfaatkan data yang telah dikumpulkan sebelumnya. Penelitian ini mempelajari tingkat paparan MeHg yang diukur melalui kadar merkuri dalam darah ibu hamil dengan potensi risiko kesehatan yang ditimbulkan.

4.1.1 Studi Kohort Prenatal

Studi Kohort Prenatal Logam Berat Kota Makassar merupakan penelitian kuantitatif dengan desain longitudinal yang dilakukan secara berkala pada ibu hamil yang menjalani pemeriksaan *Antenatal Care* (ANC). Populasi penelitian ini berjumlah 668 ibu hamil yang berasal dari beberapa puskesmas di Kota Makassar, yaitu Puskesmas Kapasa, Bangkala, Sudiang, Antang Perumnas, Tabaringan, Dahlia, Kaluku Bodoa, Barombong, Pattingalloang, Barayya, Tamangapa, Sudiang Raya, Andalas, Pampang, Batua, Bira, dan Tamalate. Sampel dalam penelitian ini berjumlah 333 ibu hamil.

Pengumpulan data dilakukan melalui wawancara terstruktur menggunakan kuesioner yang mencakup karakteristik responden, riwayat kehamilan, paparan lingkungan, kondisi tempat tinggal, serta pola konsumsi termasuk seafood sebagai sumber potensial paparan merkuri. Selain itu, dilakukan pemeriksaan biomarker melalui pengambilan sampel biologis seperti darah, urin, rambut, dan feses untuk mengukur kadar logam berat dalam tubuh ibu hamil.

2.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Kota Makassar dengan memanfaatkan data sekunder yang bersumber dari Studi Kohort Prenatal Logam Berat yang dilakukan di beberapa puskesmas sebagai lokasi pengambilan data primer. Dalam penelitian ini, peneliti tidak melakukan pengambilan data secara langsung, melainkan menggunakan data yang telah tersedia dari hasil penelitian sebelumnya. Proses pengolahan, analisis, dan interpretasi data dilakukan oleh peneliti pada periode Februari–April 2026. Rentang waktu tersebut mencakup kegiatan pengumpulan data sekunder, pengolahan data, hingga analisis hasil penelitian.

2.3 Populasi dan Sampel

a. Populasi

Populasi dalam penelitian ini adalah Ibu Hamil yang ada di Kota Makassar yang melakukan pemeriksaan *Antenatal Care* (ANC) di Puskesmas Kapasa, Puskesmas Bangkala, Puskesmas Sudiang, Puskesmas Antang Perumnas, Puskesmas Tabaringan, Puskesmas

Dahlia, Puskesmas Kaluku Bodoa, Puskesmas Barombong, Puskesmas Pattingalloang, Puskesmas Barayya, Puskesmas Tamangapa, Puskesmas Sudiang Raya, Puskesmas Andalas, Puskesmas Pampang, Puskesmas Batua, Puskesmas Bira, dan Puskesmas Tamalate pada Studi Kohort Prenatal Logam Berat Kota Makassar.

b. Sampel

Sampel dalam penelitian ini adalah ibu hamil berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang diperoleh berdasarkan data dari Studi Kohort Prenatal Logam Berat Kota Makassar. Pengambilan sampel dalam penelitian ini dilakukan dengan teknik Teknik *non probability sampling*, yaitu *Purposive sampling*

1. Kriteria Inklusi

- a. Data ibu hamil yang terdeteksi kadar Hg dalam darah yang terdapat di Puskesmas Tamangapa, Puskesmas Sudiang Raya, Puskesmas Andalas, Puskesmas Pampang, Puskesmas Batua, Puskesmas Bira, Puskesmas Tamalate, Puskesmas Dahlia, Puskesmas Pattingalloang, Puskesmas Bangkala, dan Puskesmas Antang.

2. Kriteria Eksklusi

- a. Data ibu hamil yang tidak lengkap data Berat Badan (BB)

Jumlah sampel diperoleh dengan menggunakan rumus Lemeshlow yang digunakan pada penelitian cross sectional. Adapun sebagai berikut:

$$n = \frac{Z^2 \cdot p \cdot (1-p)}{d^2}$$

Keterangan:

n = jumlah sampel

z = nilai tingkat kepercayaan: 95% (1,96)

p = proporsi yang diketahui dalam populasi: 0,274 (Khairunnisa, 2023)

d = sampling error: 10%

$$n = \frac{1,96^2 \times 0,274 (1-0,274)}{0,1^2}$$

$$n = \frac{0,764}{0,01}$$

$$n = 76,4 = 76$$

Maka diperoleh hasil jumlah sampel minimal yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah sebanyak 76 responden. Untuk mengurangi bias dan menanggulangi kemungkinan adanya sampel

drop out, maka jumlah sampel di tambah 10% (4) dari total jumlah sampel, sehingga di bulatkan menjadi 80 orang.

2.4 Analisis Merkuri

Pengambilan dan Pemeriksaan Darah dilakukan oleh Petugas Kesehatan sesuai dengan SNI di Balai besar Laboratorium Kesehatan Makasar. Berikut adalah alat dan alat yang digunakan dalam pengambilan sampel beserta langkah-langkah proses pengambilan sampel darah untuk analisis merkuri.

1. Alat dan Bahan

a. Alat

- 1) Alat tulis dan label
- 2) Gelas ukur
- 3) ICP (*Inductively Coupled Plasma*)
- 4) Jarum dan lancet
- 5) Kuesioner
- 6) Labu ukur
- 7) Pipet ukur
- 8) Rak tabung nessler
- 9) Tabung nessler
- 10) Tabung vakum (darah)
- 11) *Tourniquet*
- 12) *Water bath*

b. Bahan

- 1) *Alcohol swab*
- 2) Akuades
- 3) *Handscoon*
- 4) Larutan asam nitrat pekat 65%
- 5) Larutan standar
- 6) Masker
- 7) Sampel darah

2. Cara Kerja

a. Pengambilan Darah

- 1) Lengan responden diikat dengan tourniquet atau pengikat lengan untuk memperlambat aliran darah sehingga pembuluh darah vena lebih terlihat jelas dan memudahkan pengambilan sampel darah.
- 2) Area pengambilan sampel dibersihkan dengan lap alkohol atau kapas.
- 3) Sampel darah diambil menggunakan jarum suntik.
- 4) Sampel darah dimasukkan ke dalam tabung berwarna ungu yang berisi 3 cc EDTA (ethylen diamine tetra acetic acid).
- 5) Wadah sampel dilabeli dengan nama sampel dan kodenya.

b. Preparasi dengan Destruksi Basah

- 1) Ambil 1 ml sampel darah, masukkan dalam tabung nessler.
- 2) Tambahkan asam nitrat HNO_3 5 ml.

- 3) Panaskan di atas waterbath dalam suhu 95° sampai sampel menguap dan terlihat jernih.
- 4) Saring, kemudian encerkan dengan akuades sebanyak 50 ml.
- c. Tahap Pengujian Sampel
 - 1) Larutan kalibrasi diambil dari larutan standar mangan dengan konsentrasi 1000/l lalu diencerkan dalam labu ukur konsentrasi yang berbeda seperti pada standar larutan mangan.
 - 2) Larutan siap diperiksa dengan ICP.
 - 3) Setelah larutan pengujian standar mangan, dilanjutkan dengan pengujian sampel menggunakan ICP dan didapatkan hasil akhir kadar mangan dalam sampel.

2.5 Pengumpulan Data

Data sekunder adalah data yang diperoleh dari sumber yang telah ada sebelumnya. Pengumpulan data dalam penelitian ini menggunakan data sekunder yang bersumber dari Studi Kohort Prenatal Logam Berat Kota Makassar. Penggunaan data sekunder dilakukan dengan memanfaatkan data yang telah dikumpulkan sebelumnya oleh tim peneliti studi kohort, sehingga tidak dilakukan pengambilan data primer secara langsung kepada responden.

2.6 Pengolahan dan Analisis Data

a. Pengolahan Data

Pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan menggunakan *Microsoft Excel*, yang difungsikan untuk pengelompokan data serta perhitungan matematis berdasarkan data sekunder dari Studi Kohort Prenatal Logam Berat Kota Makassar. Perhitungan pajanan metil-merkuri dilakukan dengan menggunakan rumus *Estimated Daily Intake* (EDI) yang diturunkan dari kadar merkuri dalam darah ibu hamil (*blood-based EDI*), dengan cara memasukkan rumus perhitungan secara langsung ke dalam lembar kerja Excel. Data yang diolah meliputi kadar merkuri dalam darah, berat badan ibu hamil, serta parameter pendukung lainnya yang digunakan untuk mengestimasi dosis harian merkuri yang diterima tubuh.

b. Analisis Data

1. Analisis Deskriptif

Proses analisis deskriptif ini difungsikan untuk mengolah data sekunder pada karakteristik responden seperti umur, usia kehamilan, Kadar Hg, Berat Badan, pendidikan menggunakan SPSS.

2. Menghitung EDI_{Blood}

Pada pendekatan EDI_{blood}, nilai EDI diturunkan dari konsentrasi biomarker dalam darah. Adapun rumusnya, sebagai berikut:

$$EDI_{\text{Blood}} = \frac{c \times v \times b}{A \times f \times bw}$$

Keterangan:

c: estimasi MeHg dalam darah ($\mu\text{g/kg}$) = 90% Hg dalam darah (ATSDR, 2024)

b: konstanta eliminasi sebesar $0,014 \text{ hari}^{-1}$

v: volume darah dalam tubuh (mL)

A: faktor penyerapan sebesar 0,95

f: fraksi dosis serap yang diserap oleh darah sebesar 0,059

bw: berat badan (kg)

3. Penilaian Dosis Respon (RFD)

Reference Dose merupakan bagian dari tahapan penilaian dosis–respon (*dose–response assessment*) yang bertujuan untuk menetapkan besaran pajanan harian suatu zat yang masih dianggap aman dan tidak menimbulkan dampak kesehatan yang merugikan sepanjang hidup, termasuk pada populasi rentan. Berdasarkan ketetapan USEPA, nilai RfD untuk MeHg ditetapkan sebesar $0,1 \mu\text{g/kg}$ berat badan per hari.

4. Mengitung *Margin of Exposure* (MoE)

MOE digunakan untuk menganalisis risiko kesehatan dengan interpretasi jika $MOE < 10$ maka sudah masuk di kategori tidak aman, MOE dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$MoE = \frac{BMDL}{EDI}$$

5. Menghitung *Risk Quotient* (RQ)

RQ digunakan untuk menilai risiko suatu paparan zat kimia pada ibu hamil. Interpretasi $RQ \geq 1$ dapat artikan risiko tinggi. Berikut rumusnya adalah sebagai berikut:

$$RQ = \frac{EDI}{RfD}$$

Keterangan:

RQ (*Risk Quotient*): Indikator risiko kesehatan non-karsinogenik

EDI (*Estimated Daily Intake*): Estimasi asupan harian zat kimia (mg/kg berat badan/hari)

RfD (*Reference Dose*): Dosis rujukan yang dianggap aman (mg/kg berat badan/hari)

2.7 Penyajian Data

Data yang telah di olah dan dianalisis kemudian disajikan dalam bentuk table, grafik dan narasi yang berisi tentang Analisis Risiko Metil-Merkuri (MeHg) dalam darah ibu hamil.