

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Landasan Teori

1. Timbal

Timbal adalah logam berat yang terdapat secara alami di dalam kerak bumi dan tersebar ke alam dalam jumlah kecil melalui proses alami. Timbal yang ada di lingkungan lebih banyak dihasilkan oleh kegiatan manusia dibandingkan timbal yang berasal dari proses alami. Timbal tidak dapat terurai secara biologis dan toksisitasnya tidak berubah sepanjang waktu. Anak dapat menyerap hingga 50% Timbal yang masuk ke dalam tubuh, sedangkan orang dewasa hanya menyerap 10-15% (Rahayu & solihat, 2018).



Sumber : Rahayu & solihat, 2018

Gambar 2.1 Logam Timbal (Pb)

a. Karakteristik dan sifat timbal

Timbal (Pb) yang juga dikenal sebagai timah hitam, adalah logam berat dengan titik lebur yang rendah, mudah dibentuk, dan memiliki sifat kimia yang aktif. Karena sifat-sifat tersebut, timbal sering digunakan untuk melapisi logam agar tidak berkarat. Timbal berwarna abu-abu kebiruan mengkilat, bersifat lunak, dan memiliki bilangan oksidasi +2. Timbal merupakan logam yang sangat berbahaya bagi makhluk hidup karena dapat menyebabkan kanker, mutasi, sulit terurai dalam jangka panjang, dan toksisitasnya tetap tidak berubah. Timbal memiliki nomor atom 82, berat atom 207,2, titik leleh 1.740°C, dan massa jenis 11,34 g/cm³ (Rahayu & solihat, 2018).

Tabel 2. 1 sifat sifat fisika timbal

Sifat Fisika Timbal	Keterangan
Nomor atom	83
Densitas (g/cm ³)	11,34
Titik lebur (°C)	327,46
Titik didih (°C)	1.749
Kalor peleburan (kJ/mol)	4,77
Kalor penguapan (kJ/mol)	179,5
Kapasitas pada 25°C (J/mol.K)	26,65
Konduktivitas termal pada 300K (W/m K)	35,5
Ekspansi termal 25°C (μm/ m K)	28,9
Kekerasan (skala Brinell=Mpa)	38,6

Sumber : Rachmayani, 2015

b. Toksisitas Logam Timbal (Pb)

Toksisitas logam berat sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor fisika, kimia, dan biologi lingkungan. Beberapa kondisi lingkungan tersebut dapat mengubah laju absorpsi logam serta mempengaruhi kondisi fisiologis, sehingga menimbulkan efek berbahaya dari logam tersebut. Pengumpulan logam berat Pb dalam tubuh manusia secara berkelanjutan dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan seperti anemia, kemandulan, penyakit ginjal, kerusakan saraf, dan bahkan dapat berujung pada kematian. Bentuk timbal, baik anorganik maupun organik, memiliki tingkat toksisitas yang serupa pada manusia. Contohnya, dalam bentuk organik seperti tetraetil-timbal dan tetrametil timbal (TEL dan TML). Kehadiran timbal di dalam tubuh dapat menghambat fungsi enzim. Namun, yang paling berbahaya adalah toksisitas timbal akibat gangguan dalam penyerapan kalsium (Ca), yang dapat mengakibatkan penarikan deposit timbal dari tulang (Rahayu & solihat, 2018).

Timbal merupakan logam beracun yang memiliki sifat kumulatif. Oleh karena itu, mekanisme toksisitasnya dapat dibedakan menurut berbagai organ yang terpengaruh, sebagai berikut:

- 1) Sistem hemopoietik: timbal akan menghambat sistem pembentukan hemoglobin sehingga menyebabkan anemia.
- 2) Sistem saraf pusat dan tepi: dapat menyebabkan gangguan enselfalopati dan gejala gangguan saraf perifer.

- 3) Sistem ginjal : dapat menyebabkan aminoasiduria, fostfaturia, gluksoria, nefropati, fibrosis dan atrofi glomerular.
- 4) Sistem gastro-intestinal: dapat menyebabkan kolik dan konstipasi
- 5) Sistem kardiovaskular: menyebabkan peningkatan permeabilitas kapiler pembuluh darah.
- 6) Sistem reproduksi: dapat menyebabkan kematian janin pada wanita dan hipospermia dan teratospermia.

c. Diagnosa

Untuk mencegah keracunan dan toksitas timbal, diagnosis yang akurat adalah isu utama dan sangat penting. Untuk mencapai diagnosis yang tepat, investigasi mengenai kemungkinan jalur paparan harus dilakukan. Investigasi ini perlu mencakup riwayat medis serta identifikasi tanda-tanda klinis. Melibatkan tenaga medis yang tepat, seperti ahli toksikologi klinis dan spesialis medis, dapat sangat membantu dalam penegakan diagnosis dan perawatan yang sesuai.

Pengupasan basofilik merupakan tanda signifikan dari keracunan timbal. Proses ini membuat titik-titik pada sel darah merah menjadi terlihat saat diamati melalui mikroskop. Oleh karena itu, pemeriksaan lapisan darah untuk mencari tanda-tanda tersebut dapat efektif dalam mendeteksi keracunan timbal. Keracunan timbal juga berkaitan dengan anemia defisiensi besi. Evaluasi keracunan timbal dapat dilakukan dengan mengukur *erythrocyte protoporphyrin* (EP) dalam sampel darah. EP diketahui mengalami peningkatan ketika kadar timbal dalam darah tinggi, dengan adanya penundaan beberapa minggu. Namun, tingkat EP itu sendiri tidak cukup sensitif untuk mendeteksi kadar timbal dalam darah yang tinggi di bawah sekitar 35 μ g/dL. Mengingat ambang batas yang lebih tinggi untuk deteksi dan fakta bahwa kadar EP juga meningkat pada kondisi defisiensi zat besi, penggunaan metode ini untuk mendeteksi paparan timbal telah menurun. Kadar timbal dalam darah adalah indikator utama dari paparan timbal saat ini, dan bukan beban timbal secara keseluruhan dalam tubuh. Pengukuran kadar timbal dalam darah tidak memberikan gambaran yang akurat mengenai timbal yang disimpan dalam tubuh, melainkan hanya berfungsi sebagai indikator paparan timbal yang terkini. Timbal dalam seluruh tubuh dapat diukur secara non-invasif dalam tulang menggunakan fluoresensi sinar-X, yang

mungkin merupakan ukuran terbaik untuk paparan kumulatif dan beban total tubuh. Selain itu, sinar-X juga dapat mengidentifikasi bahan asing yang mengandung timbal, seperti serpihan cat yang ada dalam saluran pencernaan (Putra dkk., 2023).

d. Analisis logam timbal dengan ICP-OES

ICP-OES adalah teknik yang cukup kompleks, namun memiliki keunggulan dalam sensitivitas, selektivitas, dan analisis multielemen. Metode ini dapat mengidentifikasi dan mengukur konsentrasi berbagai jenis logam dengan batas deteksi yang rendah. Selain itu, ICP-OES adalah salah satu teknik spektrofotometri untuk pengukuran logam yang sangat sensitif. Metode ini mampu melakukan analisis terhadap berbagai jenis logam secara simultan dan memiliki batas deteksi yang baik, menjadikannya sesuai untuk berbagai aplikasi. Komponen utama dalam sistem ICP-OES terdiri dari pompa peristaltik, plasma, nebulizer, spray chamber, torch, RF generator, dan detektor. Validasi metode ICP-OES dilakukan dengan menetapkan pengukuran tertentu, seperti penentuan linieritas, akurasi, presisi, dan limit deteksi metode (MDL) (Sari & Sutopo, 2024).

Secara ringkas, prinsip dasar ICP-OES melibatkan pemanfaatan plasma terinduksi yang berfungsi untuk mengeksitasi sampel. Proses ini mengakibatkan sampel memancarkan emisi cahaya spesifik, yang selanjutnya akan dideteksi dan dianalisis. Tujuan akhir dari analisis ini adalah untuk menentukan komposisi unsur-unsur dalam sampel secara kuantitatif (Sari & Sutopo, 2024)

2. Timbal dan Sumber pajanannya

a. Sumber dari Alam

Pemahaman tentang sumber timbal di lingkungan dan jalur paparan sangat penting untuk pengembangan dan penerapan peraturan guna mengurangi paparan. Timbal merupakan logam berat yang terdapat secara alami di kerak bumi. Ekstraksi dan penggunaan timbal secara luas telah mencemari lingkungan, membuat orang terpapar timbal, dan menimbulkan masalah kesehatan masyarakat yang signifikan di banyak bagian dunia. Jalur utama paparan timbal pada manusia adalah melalui inhalasi dan konsumsi (Brown, 2019).

Timbal terbentuk secara alami di kerak bumi dan dapat ditemukan di atmosfer melalui proses cuaca, tanah, atau aktivitas gunung api. Di dalam tanah, timbal secara bertahap membentuk senyawa-senyawa yang tidak larut dalam air, seperti garam-garam sulfat, sulfida, oksida, dan fosfat. Keberadaan logam timbal yang melimpah di bumi mengakibatkan peningkatan kontaminasi timbal di lingkungan (Pratiwi dkk., 2018).

Selain itu timbal juga terdapat dalam air alami (air yang tidak diolah), udara (sumber alami timbal di atmosfer termasuk emisi vulkanik dan debu tanah), tanah dan sedimen (penelitian dengan kadar timbal di atas standar dilakukan di dekat tambang atau lapangan tembak) (Stalwick dkk., 2023).

Kontaminasi Pb pada sumber daya udara, tanah, dan air telah dikaitkan dengan penyebab alami, seperti pelapukan geokimia, emisi semprotan laut, aktivitas gunung berapi, dan remobilisasi sedimen, tanah, dan air dari wilayah pertambangan. Pb tersedia di tanah/sedimen sebagai ion logam bebas. Pb juga dapat teradsorpsi pada permukaan partikel seperti bahan biologis, oksida besi, partikel lempung, dan bahan organik. Secara umum, konsentrasi Pb antropogenik yang lebih tinggi terakumulasi di permukaan tanah dan dapat berkurang seiring dengan kedalaman (Kumar dkk., 2020)

b. Sumber dari Aktivitas manusia

Pencemaran lingkungan disebabkan salah satunya oleh perkembangan industri yang pesat, yang menjadi salah satu faktor penyebab pencemaran logam berat di lingkungan. Pencemaran logam berat cenderung meningkat akibat proses industri yang berlangsung. Pencemaran logam berat dalam lingkungan dapat mengakibatkan bahaya bagi kesehatan.

Sumber emisi zat pencemar atau polutan yang ada di industri logam mencakup partikel-partikel seperti debu, abu, dan logam, di antaranya timbal. Selain itu, timbal juga dapat berasal dari pembakaran bahan aditif bensin dari kendaraan bermotor. Timbal (Pb) yang bersumber dari bensin berasal dari senyawa timbal organik, yaitu Ethyl Lead (TEL) dan Tetra Methyl Lead (TML) dengan rumusan kimia masing-masing Pb (C₂H₅) dan Pb (CH₃)₄, yang ditambahkan ke dalam bensin untuk meningkatkan bilangan oktan dan mencegah terjadinya letupan. Sekitar 75% timbal dalam bensin diemisikan

dalam bentuk partikel, sedangkan 25% lainnya tetap berada dalam saringan asap kendaraan (Purwoko & Prastiwi, 2019).

c. Timbal dari Industri

Industri dapat mencemari lingkungan dengan timbal melalui berbagai cara, terutama melalui emisi, limbah, dan produk yang mengandung logam berat ini. Berikut adalah beberapa cara utama bagaimana industri menyebabkan pencemaran timbal:

1) Emisi Udara dari Proses Industri

Banyak industri yang melepaskan timbal ke udara selama proses produksinya, terutama industri yang berhubungan dengan peleburan logam, baterai, dan manufaktur kimia. Pembakaran bahan yang mengandung timbal atau logam berat lainnya dapat menghasilkan uap dan partikel timbal, yang kemudian tersebar melalui udara dan dapat mengendap pada tanah, air, dan tanaman di sekitarnya.

Salah satu sumber energi yang menghasilkan emisi udara, termasuk gas buangan dan abu yang mengandung timbal, adalah batu bara. Walaupun penggunaan batu bara sebagai pengganti bahan bakar minyak (BBM) menawarkan keuntungan tertentu, di sisi lain, hal ini dapat menimbulkan problem baru bagi lingkungan sekitar. Emisi gas buang dan abu yang dihasilkan dari pembakaran batu bara menjadi salah satu dampak negatif yang patut diperhatikan. Dari pemakaian batu bara, abu yang dihasilkan berkisar antara 2-10%, bergantung pada jenis bahan baku yang digunakan, apakah batu bara berkadar kalori rendah atau tinggi (Febrion dkk., 2018).

2) Limbah Cair yang Mengalir ke Perairan

Limbah cair dari industri yang tidak dikelola dengan baik dapat mengandung kadar timbal yang tinggi. Limbah ini sering kali dibuang ke sungai, danau, atau saluran air tanpa pengolahan yang memadai, mencemari sumber air. Timbal dalam air dapat terakumulasi dalam organisme air, dan akhirnya mencapai manusia melalui rantai makanan.

Menurut WHO, 80% limbah cair industri di seluruh dunia dibuang sembarangan. Di negara berkembang, sekitar 70% limbah cair industri dibuang tanpa pengolahan terlebih dahulu. Kementerian Lingkungan Hidup

dan Kehutanan mencatat bahwa 75% sungai di Indonesia mengalami pencemaran berat akibat limbah cair (Salindra dkk., 2021).

3. Metabolisme Timbal (pb) dalam Tubuh

Pb masuk ke dalam tubuh manusia melalui saluran pernapasan, yang merupakan jalur pemajaman terbesar, serta melalui saluran pencernaan, khususnya pada anak-anak dan orang dewasa yang memiliki kebersihan perorangan yang kurang baik. Penyerapan Pb dari udara pada saluran pernapasan mencapai sekitar 40%, sedangkan pada saluran pencernaan sekitar 5-10%. Selanjutnya, Pb didistribusikan ke dalam darah, di mana sekitar 95% terikat pada sel darah merah, dan sisanya terikat pada plasma. Sebagian dari Pb tersebut disimpan dalam jaringan lunak dan tulang. Ekskresi Pb terutama terjadi melalui ginjal dan saluran pencernaan (Rosita,dkk. 2018).

a. Absorbansi

Absorpsi Pb dalam saluran pernapasan dipengaruhi oleh tiga proses, yaitu deposisi, pembersihan mukosiliar, dan pembersihan alveolar. Partikel yang lebih besar cenderung lebih banyak terdeposit di saluran pernapasan bagian atas dibandingkan dengan partikel yang lebih kecil. Proses pembersihan mukosiliar mengangkut partikel di saluran pernapasan bagian atas menuju nasofaring, kemudian partikel tersebut ditelan. Rata-rata, sekitar 10-0% Pb yang terhirup diabsorpsi melalui paru-paru, sementara sekitar 5-1. 0% dari yang tertelan diabsorpsi melalui saluran cerna (Rosita dkk., 2018).

b. Distribusi dan penyimpanan

Timah hitam yang terabsorpsi oleh tubuh diangkut oleh darah, di mana sekitar 95% Pb dalam darah diikat oleh eritrosit. Timah tersebut dibagi menjadi dua kelompok, yaitu yang menuju jaringan lunak (seperti sumsum tulang, sistem saraf, ginjal, dan hati) serta yang menuju jaringan keras (seperti tulang, kuku, rambut, dan gigi). Gigi dan tulang panjang cenderung mengandung Pb dalam jumlah yang lebih banyak dibandingkan dengan tulang lainnya (Rosita dkk., 2018).

Setelah penyerapan, konsentrasi Pb dalam darah akan mencapai keseimbangan kembali sekitar 3 bulan setelah paparan, dengan sisa timbal yang menyebar ke berbagai bagian tubuh seperti korteks serebral, sumsum tulang

belakang, ovarium, pankreas, limpa, prostat, kelenjar adrenal, otak, jaringan lemak, testis, jantung, dan otot rangka. Pada orang dewasa, Pb terakumulasi di tulang, dengan konsentrasi yang meningkat hingga sepuluh kali lipat seiring bertambahnya usia, terutama di tulang kering. Setelah terpapar, waktu paruh eliminasi timbal dari darah dan jaringan lunak berkisar sekitar 30 hari, sedangkan dari tulang berkisar antara 10 hingga 20 tahun; hal ini memungkinkan timbal bertahan di dalam tubuh selama beberapa dekade. Sebagian besar timbal disimpan di hati, dan dalam jumlah yang lebih sedikit, di ginjal (AE & JR, 2020).

c. Ekskresi

Ekskresi Pb terjadi melalui beberapa cara, dengan metode yang paling utama melalui ginjal dan saluran pencernaan. Sebagian besar ekskresi Pb, sekitar 75 - 80%, dilakukan melalui urine, sementara 15% lainnya dikeluarkan melalui feces, dan sisanya melalui empedu, keringat, rambut, dan kuku. Kadar Pb dalam urine mencerminkan pajanan recent, sehingga pemeriksaan Pb urine sering digunakan untuk mengevaluasi pajanan yang berkaitan dengan pekerjaan. Secara umum, ekskresi Pb berlangsung sangat lambat. Waktu paruh timah hitam dalam darah sekitar 25 hari, sedangkan dalam jaringan lunak mencapai 40 hari, dan pada tulang dapat bertahan hingga 25 tahun (Rosita dkk., 2018).

4. Timbal dalam Darah

a. Kadar timbal dalam darah

Standar emas saat ini untuk menentukan kadar Pb dalam darah adalah analisis darah vena lengkap dengan Inductively Couple Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). Meskipun sensitivitas ICP-MS untuk mendeteksi Pb dalam sampel darah tinggi, instrumen ini memiliki keterbatasan yang nyata untuk bekerja dengan DBS seperti kebutuhan volume sampel yang relatif tinggi (200–500 μ L dibandingkan dengan satu punch DBS 3 mm yang mungkin 3 μ L), adanya efek matriks, potensi interferensi poliatomik dan non-poliatomik, dan biaya yang relatif tinggi yang terkait dengan pengadaan dan pengoperasian. Sebagai alternatif ICP-MS, Total Reflection X-Ray Fluorescence (TXRF) terbukti layak untuk analisis DBS karena merupakan teknik analisis multi-elemen yang memungkinkan analisis volume kecil $\leq 10 \mu$ L (Brokowski C, 2019).

Kadar timbal dalam darah mencerminkan kontinuitas dinamis antara paparan, penyerapan, distribusi, dan ekskresi, sehingga menjadi salah satu indikator penting untuk mengidentifikasi dan memantau paparan yang sedang berlangsung. Rata-rata kadar normal Pb dalam darah orang dewasa berkisar antara 10-25 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$ darah. Kadar timbal dalam darah yang mencapai 5 $\mu\text{g}/\text{dl}$ juga dapat meningkatkan tekanan darah, sehingga 5 $\mu\text{g}/\text{dl}$ ditetapkan sebagai nilai ambang batas yang perlu diwaspadai (Ardillah, 2016).

Berdasarkan ketetapan yang ditetapkan oleh CDC (Centers for Disease Control and Prevention) pada tahun 2011 mengenai nilai standar kadar timbal dalam darah, yaitu $<10\ \mu\text{g}/\text{dl}$. Menurut Menteri Kesehatan Republik Indonesia pada tahun 2002, yang tertuang dalam Keputusan Menteri Kesehatan Nomor 1406/MENKES/SK/IX/2002, ditetapkan bahwa standar pemeriksaan kadar Pb dalam spesimen biomarker manusia mengindikasikan nilai ambang batas kadar timbal dalam spesimen rambut adalah sebesar $\leq 12\ \mu\text{g}/\text{g}$.

Nilai ambang batas (NAB) yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Ketenagakerjaan No. 5 Tahun 2018 mengenai K3 Lingkungan Kerja untuk timbal hitam dan persenyawaan anorganik adalah Pb 0,05;A3;BEI, sementara kadar timbal dalam darah ditetapkan pada 30 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$. Namun demikian, indeks pajanan biologis menurut American Conference of Governmental Industrial Hygienist (ACGIH) tahun 2021 lebih rendah, yaitu 20 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$ darah. Pada pekerja wanita yang sedang hamil atau merencanakan hamil, indeks pajanan biologis kadar timbal dalam darah biasanya lebih rendah lagi, yaitu $\leq 5\ \mu\text{g}/100\text{ ml}$ darah (Perdoki, 2023).

Tabel 2. 2 Referensi kadar timbal dalam darah

Kadar Timbal Dalam Darah atau Blood Lead Level - BLL (dalam mikrogram per desiliter - ($\mu\text{g}/\text{dL}$)	Regulasi dan Rekomendasi Terkait
0.855 $\mu\text{g}/\text{dL}$	Pada tahun 2017-2018, ini adalah kadar BLL yang biasa terjadi di kalangan dewasa di Amerika Serikat.
3.5 $\mu\text{g}/\text{dL}$	Nilai referensi BLL yang dikeluarkan oleh Council of State and Territorial Epidemiologists' (CSTE) Amerika Serikat adalah 3,5 $\mu\text{g}/\text{dL}$. Nilai ini digunakan untuk mengidentifikasi orang dewasa dan anak-anak yang kadar timbal darahnya lebih tinggi daripada persentil 97,5 orang dewasa dan anak-

<p>anak di seluruh negara. The California Department of Public Health (CDPH) merekomendasikan bahwa jika kadar timbal darah (BLL) berada antara 3,5 hingga 9 $\mu\text{g}/\text{dL}$, uji BLL diulang setiap 3 bulan bagi orang dewasa hingga kadar BLL mereka kurang dari 3,5 $\mu\text{g}/\text{dL}$. American College of Occupational and Environmental Medicine (ACOEM) menyatakan bahwa disarankan bagi wanita yang sedang hamil atau berpotensi hamil untuk menghindari pajanan timbal di tempat kerja yang dapat meningkatkan kadar timbal darah (BLL) hingga sama dengan atau lebih dari 3,5 $\mu\text{g}/\text{dL}$.</p>	
5 $\mu\text{g}/\text{dL}$	Program Adult Blood Lead Epidemiology and Surveillance (ABLES) di Amerika Serikat menggunakan nilai 5 $\mu\text{g}/\text{dL}$ untuk menunjukkan peningkatan kadar timbal darah (BLL) untuk tujuan surveilans. Jika sedang hamil, wanita sebaiknya tidak melebihi 5 $\mu\text{g}/\text{dL}$. National Toxicology Program (NTP) di Amerika Serikat menyimpulkan bahwa ibu dengan kadar timbal darah (BLL) bahkan lebih rendah dari 5 $\mu\text{g}/\text{dL}$ dapat mengakibatkan pertumbuhan janin yang terhambat
10 $\mu\text{g}/\text{dL}$	Dibawah 10 $\mu\text{g}/\text{dL}$, NTP menyimpulkan bahwa timbal meningkatkan tekanan darah, risiko hipertensi, dan kejadian tremor esensial. ACOEM dan CDPH merekomendasikan pengulangan tes BLL setiap dua bulan jika hasil BLL seseorang berada di antara 10 hingga 19 $\mu\text{g}/\text{dL}$.
15 $\mu\text{g}/\text{dL}$	Michigan Occupational Safety and Health Administration (MIOSHA) mengharuskan pengujian BLL setiap 2 bulan bagi karyawan yang ditemukan memiliki BLL sebesar 15 $\mu\text{g}/\text{dL}$ atau lebih tinggi. Karyawan dapat kembali bekerja ketika mereka memiliki 2 tes BLL berturut-turut di bawah 15 $\mu\text{g}/\text{dL}$. ACOEM berpendapat bahwa pekerja seharusnya tidak kembali bekerja sampai kadar timbal darah (BLL) berada di bawah 15 $\mu\text{g}/\text{dL}$ dan setelah evaluasi kesehatan pekerja serta status kerja oleh seorang dokter
20 $\mu\text{g}/\text{dL}$	ACOEM dan CDPH merekomendasikan tidak laik kerja jika seorang pekerja memiliki dua tes BLL berturut-turut antara 20-29 $\mu\text{g}/\text{dL}$. Panduan American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) menyatakan bahwa pekerja biasa dapat mengalami kadar timbal darah (BLL) sebesar 20 $\mu\text{g}/\text{dL}$ tanpa efek kesehatan yang merugikan. Panduan ini ditujukan untuk digunakan dalam praktik higiene industri, namun yang lain mungkin ingin menggunakan panduan ini sebagai tambahan dalam program keselamatan dan kesehatan kerja.
25 $\mu\text{g}/\text{dL}$	ACOEM dan CDPH merekomendasikan tidak laik kerja jika seorang pekerja memiliki dua tes BLL berturut-turut antara 20-29 $\mu\text{g}/\text{dL}$. Occupational Safety and Health Administration (OSHA) di Amerika Serikat menganggap kadar timbal darah (BLL) sebesar 25 $\mu\text{g}/\text{dL}$ sebagai kondisi serius dan harus ditangani melalui pemeriksaan lebih lanjut. Penentuan ini didasarkan pada Program Emphasis Nasional (NEP) OSHA untuk Timbal, yang dirilis untuk melindungi kesehatan dan keselamatan pekerja di industri yang dianggap memiliki risiko lebih tinggi bagi manusia dan lingkungan.
30 $\mu\text{g}/\text{dL}$	ACOEM dan CDPH merekomendasikan tidak laik kerja jika seorang pekerja memiliki dua tes BLL berturut-turut antara 20-29 $\mu\text{g}/\text{dL}$. Occupational Safety and Health Administration (OSHA) di Amerika Serikat menganggap kadar timbal darah (BLL) sebesar 25 $\mu\text{g}/\text{dL}$ sebagai kondisi serius dan harus ditangani melalui pemeriksaan lebih lanjut. Penentuan ini didasarkan pada Program Emphasis Nasional (NEP) OSHA untuk Timbal, yang dirilis untuk melindungi kesehatan dan keselamatan pekerja di industri yang dianggap memiliki risiko lebih tinggi bagi manusia dan lingkungan
40 $\mu\text{g}/\text{dL}$	Jika seorang pekerja telah dinyatakan tidak laik kerja berdasarkan BLL yang tinggi sebelumnya, OSHA mengizinkan karyawan untuk kembali bekerja setelah 2 tes BLL berturut-turut terukur di bawah 40 $\mu\text{g}/\text{dL}$
50-60 $\mu\text{g}/\text{dL}$	Pada kadar timbal darah (BLL) sebesar 50-60 $\mu\text{g}/\text{dL}$, OSHA mengharuskan tidak laik kerja. Pemberi kerja harus menyingkirkan semua pekerja yang terpapar timbal di tempat kerja jika kadar timbal darah (BLL) mereka

mencapai 50 $\mu\text{g}/\text{dL}$ atau lebih untuk pekerja di sektor konstruksi, atau 60 $\mu\text{g}/\text{dL}$ atau lebih untuk pekerja di sektor industri umum.

Sumber : Perdoki, 2023

b. Efek Timbal dalam Darah

Studi tentang toksisitas menunjukkan bahwa kadar timbal dalam darah yang mencapai 100 mikrogram/l dianggap sebagai tingkat yang aktif, yang dapat berpengaruh pada gangguan perkembangan serta perilaku. Apabila kadar timbal mencapai 450 mikrogram/l, maka penanganan segera dalam waktu 48 jam diperlukan. Sementara itu, kadar lebih dari 700 mikrogram/l dapat mengakibatkan kondisi darurat medis. Di sisi lain, kadar timbal yang melebihi 1200 mikrogram/l tergolong sangat toksik dan berpotensi menyebabkan kematian pada anak (Rahayu & solihat, 2018).

Gangguan awal dalam biosintesis hem belum menunjukkan adanya masalah klinis, dan gangguan ini hanya dapat diidentifikasi melalui pemeriksaan laboratorium. Jika gangguan ini berlanjut, akan muncul efek neurologis serta dampak lain pada organ target, termasuk anemia. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa gangguan fungsi saraf dipengaruhi oleh masalah dalam sintesis hemoglobin. Paparan timbal yang berkepanjangan dapat menyebabkan gangguan pada berbagai sistem organ. Efek awal dari keracunan timbal kronis, sebelum mencapai organ target, adalah adanya gangguan dalam biosintesis hemoglobin; jika tidak segera diatasi, keadaan ini akan terus berlanjut, mempengaruhi organ lain.

Pada tulang, timbal terdapat dalam bentuk Pb-fosfat/Pb₃(PO₄)₂, dan selama timbal terikat dalam tulang, tidak akan menimbulkan gejala sakit pada penderitanya. Namun yang berbahaya adalah toksisitas timbal akibat gangguan absorpsi kalsium, di mana terjadinya desorpsi kalsium dari tulang menyebabkan penarikan deposit timbal dari tulang. Mengonsumsi diet rendah fosfat akan menyebabkan pelepasan timbal dari tulang ke dalam darah. Penambahan vitamin D dalam makanan dapat meningkatkan deposit timbal dalam tulang, meskipun kadar fosfatnya rendah, sehingga mengurangi pengaruh negatif timbal. Meskipun jumlah timbal yang diserap oleh tubuh hanya sedikit, logam ini dapat menjadi sangat berbahaya. Ini karena senyawa timbal dapat memberikan efek racun terhadap banyak fungsi organ dalam tubuh.

Timbal dapat menyebabkan dua jenis anemia, yang sering disertai dengan eritrosit berbintik basofilik. Pada keracunan timbal akut, terjadi anemia hemolitik, sedangkan pada keracunan timbal kronis, terjadi anemia makrositik hipokromik. Hal ini disebabkan oleh menurunnya masa hidup eritrosit akibat interfensi logam timbal dalam sintesis hemoglobin, serta peningkatan korproporfirin dalam urin. Menurut Adnan, kadar timbal dalam darah yang dapat menyebabkan anemia klinis adalah sebesar 70 µg/dL atau 0,7 mg/L. Sementara itu, berdasarkan US Department of Health and Human Services, kadar timbal dalam darah yang dapat menimbulkan gangguan pada hemoglobin adalah sebesar 50 µg/dL atau 0,5 mg/L. (Ardillah, 2016).

c. Faktor yang mempengaruhi Pb dalam darah

1) Faktor lingkungan

a) Kandungan Pb di udara

Konsentrasi tertinggi timbal di udara ambient ditemukan pada daerah dengan populasi yang padat; semakin besar suatu kota, maka semakin tinggi konsentrasi timbal di udara ambient. Kualitas udara di jalan raya dengan lalu lintas yang sangat padat mengandung timbal lebih tinggi dibandingkan dengan udara di jalan raya dengan kepadatan lalu lintas yang rendah.

Terdapat berbagai sumber yang menyebabkan timbal berada dalam udara. Di antara sumber alternatif yang signifikan adalah pembakaran batu bara, asap dari pabrik yang memproduksi senyawa timbal alkil, timbal oksida, peleburan biji timbal, dan transfer bahan bakar kendaraan bermotor, karena senyawa timbal yang terkandung dalam bahan bakar tersebut

b) Dosis dan lama pemaparan

Dosis (konsentrasi) yang tinggi dan paparan yang berkepanjangan dapat menyebabkan efek yang serius dan berpotensi berbahaya. Selain itu, durasi seseorang bekerja dalam sehari juga dapat memengaruhi kadar Pb yang terdapat dalam darahnya. Menurut Kesuma, durasi paparan berpengaruh terhadap konten timbal dalam darah, di mana semakin lama seseorang terpapar, semakin tinggi pula kadar timbal dalam darahnya.

c) Kelangsungan pemaparan

Efek timbal yang ringan bergantung pada proses pemaparan timbal, apakah itu dilakukan secara terus menerus (kontinyu) atau terputus-putus (intermitten). Pemaparan yang dilakukan secara terus menerus akan menghasilkan efek yang lebih berat dari pada pemaparan yang bersifat terputus-putus.

d) Jalur pemaparan (cara kontak)

Timbal dapat memberikan dampak buruk bagi kesehatan jika masuk melalui saluran yang benar. Individu yang mengalami sumbatan hidung mungkin memiliki risiko lebih tinggi, karena pernapasan melalui mulut memudahkan inhalasi partikel debu yang lebih besar. Suyono menjelaskan bahwa setiap emisi kendaraan cenderung mengakibatkan pemaparan melalui inhalasi, karena timbal yang diemisikan berbentuk gas.

2) Faktor Manusia

a) Umur

Usia muda umumnya lebih sensitif terhadap paparan timbal, yang berkaitan dengan perkembangan organ dan fungsi yang belum sepenuhnya matang. Sementara itu, pada usia lanjut, sensitivitas terhadap timbal lebih tinggi dibandingkan dengan rata-rata orang dewasa, biasanya disebabkan oleh penurunan aktivitas enzim biotransformasi seiring bertambahnya umur, serta berkurangnya daya tahan organ tertentu terhadap efek timbal. Seiring bertambahnya usia seseorang, konsentrasi timbal yang terakumulasi dalam jaringan tubuh juga semakin tinggi. Faktor umur dan jenis kelamin berpengaruh terhadap kadar Pb dalam jaringan tubuh individu. Semakin tua seseorang, semakin tinggi pula konsentrasi Pb yang terakumulasi di jaringan tubuhnya. Jenis jaringan berpengaruh terhadap kadar Pb yang ada dalam tubuh. Hal serupa juga diungkapkan oleh Mormontoy, Gastanaga, bahwa polisi lalu lintas yang berusia lebih dari 30 tahun memiliki risiko 4,8 kali lebih tinggi untuk memiliki kadar Pb dalam darah yang lebih tinggi.

b) Status kesehatan, status gizi dan tingkat kekebalan (imunologi)

Kondisi sakit atau disfungsi dapat meningkatkan tingkat toksisitas timbal serta mempermudah terjadinya kerusakan organ. Selain itu, malnutrisi, hemoglobinopati, dan enzimopati seperti anemia serta defisiensi glukosa-6-

fosfat dehidrogenase juga meningkatkan kerentanan terhadap paparan timbal. Kekurangan gizi akan menambah kadar timbal yang bebas dalam darah. Diet yang rendah kalsium berakibat pada peningkatan kadar timbal dalam jaringan lunak serta mengakibatkan efek racun pada sistem hematopoietik. Selain itu, diet rendah kalsium dan fosfor akan meningkatkan absorpsi timbal di usus. Defisiensi besi, pola makan dengan rendah protein dan tinggi lemak juga turut meningkatkan absorpsi timbal. Namun, asupan zinc dan vitamin C secara terus menerus dapat mengurangi kadar timbal dalam darah, meskipun paparan timbal tetap berlangsung.

c) Jenis kelamin

Dampak toksik pada pria dan wanita memiliki pengaruh yang berbeda. Wanita lebih rentan dibandingkan pria. Ini disebabkan oleh perbedaan dalam faktor ukuran tubuh (fisiologis), keseimbangan hormonal, serta perbedaan dalam metabolisme.

d) Jenis jaringan

Kadar timbal dalam jaringan otak berbeda dari kadar timbal yang terdapat dalam jaringan paru-paru atau jaringan lainnya. Timbal yang tertinggal dalam tubuh, baik berasal dari udara maupun melalui makanan dan minuman, cenderung mengakumulasi terutama di dalam kerangka, mencapai 90-95%. Karena analisis Pb dalam tulang cukup sulit dilakukan, pengukuran kandungan Pb dalam tubuh umumnya ditentukan dengan menganalisis konsentrasi Pb dalam darah atau urin. Konsentrasi Pb dalam darah dianggap sebagai indikator yang lebih baik dibandingkan dengan konsentrasi Pb dalam urin.

3) Faktor Perilaku

a) Kebiasaan Merokok

Rokok mengandung sejumlah logam berat, termasuk Pb dan Cd, yang dapat membahayakan kesehatan. Mengonsumsi rokok secara rutin meningkatkan risiko inhalasi Pb akibat paparan asap rokok. Penelitian Mormontoy dan Gastanaga menunjukkan bahwa terdapat perbedaan signifikan dalam kadar timbal dalam darah antara polisi yang merokok dan yang tidak merokok.

b) Penggunaan APD

Alat pelindung diri adalah perangkat yang digunakan oleh pekerja untuk melindungi diri dari kecelakaan yang mungkin terjadi selama menjalankan tugas mereka. Salah satu alat pelindung diri yang dimaksudkan untuk mengurangi penyerapan Pb adalah masker. Diharapkan penggunaan alat pelindung diri ini dapat mengurangi risiko bahaya kesehatan akibat paparan Pb yang dapat timbul dari pekerjaan mereka. Masker umumnya dipakai untuk melindungi lingkungan dari kontaminan yang dibawa oleh pengguna masker itu sendiri. Contohnya, pekerja di industri makanan menggunakan masker untuk melindungi makanan dari kemungkinan kontaminasi yang disebabkan oleh air ludah mereka, atau perawat di rumah sakit menggunakan masker untuk melindungi pasien dari potensi kontaminasi yang bisa berasal dari perawat atau dokter. Namun, masker tidak selalu pas di wajah, sehingga tidak dapat memberikan perlindungan yang efektif bagi pemakainya. Di sisi lain, respirator dirancang agar pas di wajah, sehingga mampu melindungi pengguna dari kontaminan yang ada di lingkungan sekitar.

d. Cara Menurunkan Kadar Timbal Darah

Vitamin C merupakan vitamin yang larut dalam air dan diperlukan untuk metabolisme tubuh serta mencegah stres oksidatif pada jaringan. Selain itu, vitamin C berperan dalam menghambat penyerapan timbal dan mengurangi sitotoksitas timbal, serta terbukti efektif dalam mengurangi nefrotoksitas dan berfungsi sebagai pelindung ginjal. Penelitian menunjukkan bahwa efek toksik timbal pada produksi hemoglobin dapat diperbaiki dengan pemberian vitamin C dosis 100 mg/kg berat badan. Vitamin C diketahui dapat menurunkan kadar timbal dalam darah karena ia mengurangi penyerapan timbal di usus halus.

Sebuah penelitian yang dilakukan oleh Luh Putu Ratna Sundari mengenai pemberian vitamin C 250 mg secara oral menunjukkan bahwa pemberian dosis ini mampu menurunkan kadar timbal dalam darah secara signifikan pada wanita penyapu jalan di Kota Denpasar, meskipun demikian, hal ini belum berdampak pada peningkatan jumlah eritrosit dan kadar hemoglobin. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menentukan dosis vitamin C yang tepat agar dapat efektif dalam mencegah dan mengurangi keracunan timbal di kalangan pekerja penyapu jalan (Putu dkk., 2017).

5. Dampak Timbal (Pb) Terhadap Kesehatan Manusia

a. Hati dan ginjal

Hati adalah organ penyimpanan utama akumulasi timbal. Lebih dari 33% timbal yang terakumulasi dalam tubuh manusia ditemukan di hati, diikuti oleh ginjal. Percobaan hewan yang melibatkan hepatotoksitas timbal telah menunjukkan bahwa paparan timbal mengubah enzim dan molekul yang terlibat dalam metabolisme xenobiotik, metabolisme kolesterol, dan hiperplasia hati. Toksisitas timbal telah dilaporkan menyebabkan cedera hati, osteoporosis, gangguan neurologis, dan penyakit kardiovaskular. Mekanisme toksitas timbal yang diterima adalah stres oksidatif. Hal ini sering dicapai dengan menghasilkan radikal bebas dan menguras sistem antioksidan (Ilesanmi dkk., 2022).

Beberapa studi menunjukkan bahwa paparan timbal di lingkungan dengan kadar rendah dapat mempercepat kerusakan pada insufisiensi ginjal kronis. Bahkan ketika kadar timbal berada jauh di bawah ambang batas normal yang ditemukan pada populasi umum, kadar timbal dalam darah serta beban timbal dalam darah menunjukkan peningkatan, yang dapat memprediksi percepatan perkembangan penyakit ginjal kronis. Paparan timbal yang berlangsung lama dihubungkan dengan meningkatnya tekanan darah, dan beberapa penelitian menunjukkan adanya hubungan antara paparan timbal dengan penyakit jantung koroner, variabilitas denyut jantung, serta kematian akibat stroke, walaupun bukti yang ada masih terbatas. Nefropati timbal kronis dapat terjadi akibat paparan timbal selama bertahun-tahun, yang terlihat pada biopsi ginjal dengan adanya atrofi fokal moderat, hilangnya tubulus proksimal, dan fibrosis interstitial. Paparan timbal di lingkungan dengan kadar rendah berpotensi mempercepat insufisiensi ginjal pada pasien tanpa diabetes yang memiliki penyakit ginjal kronis (Putra dkk., 2023).

Ginjal sangat rentan terhadap paparan timbal, karena ginjal terlibat dalam menyaring dan mengeluarkan timbal dari tubuh. Paparan timbal kronis dapat menyebabkan nefrotoksitas, yang bermanifestasi sebagai penurunan fungsi ginjal dan penyakit ginjal kronis. Akumulasi timbal di jaringan ginjal mengganggu proses filtrasi normal, menyebabkan kerusakan jangka panjang dan

meningkatkan risiko gagal ginjal, terutama pada populasi dengan faktor risiko tambahan seperti diabetes dan hipertensi (Cat dkk., 2023)

b. Pada Tulang

Pada tulang, ion Pb²⁺ dari logam ini dapat menggantikan posisi ion Ca²⁺ (kalsium) yang terdapat dalam jaringan tulang. Mengonsumsi makanan yang kaya kalsium akan membantu melindungi tubuh dari paparan Pb yang baru. Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Daerah (BPLHD) Provinsi Jabar telah melakukan pemantauan konsentrasi Pb pada bulan Mei 2008, khususnya dalam darah, dan menunjukkan hasil pengukuran konsentrasi Pb dalam darah yang diambil dari sampel beberapa siswa Sekolah Dasar (SD) di kota Bandung. Ditemukan bahwa sebagian besar siswa SD yang sampel darahnya diambil menunjukkan konsentrasi yang melebihi ambang batas Pb yaitu 10 µg/dl. Hal ini tentu merupakan masalah yang sangat mengkhawatirkan dan seharusnya menjadi perhatian serius dari pemerintah daerah serta seluruh anggota masyarakat (Gusnita, 2012).

c. Syaraf

Sistem saraf, terutama otak, sangat sensitif terhadap racun dari timbal. Timbal mengganggu proses tubuh yang bergantung pada kalsium, sehingga keracunan timbal mengganggu sintesis dan regulasi neurotransmitter yang berkontribusi pada spektrum gangguan kesehatan mental. Hal ini sangat memprihatinkan pada anak-anak, Dimana paparan timbal dapat menyebabkan defisit kognitif yang substansial, masalah perilaku, dan penurunan kecerdasan yang nyata. Terdapat juga hubungan kausal yang telah terbukti secara empiris antara paparan timbal dan gangguan perkembangan intelektual, gangguan pemasatan perhatian dan hiperaktif (ADHD), dan penyakit neurodegeneratif yang lebih parah seperti Alzheimer dan Parkinson. Gangguan kognitif dan perilaku yang terkait dengan paparan timbal pada anak-anak sering mengakibatkan tantangan pendidikan dan sosial jangka panjang, berkontribusi pada gangguan fungsi dan prestasi yang kurang pada populasi yang terkena dampak (Cat dkk., 2023).

d. Sistem reproduksi

Sistem reproduksi pria dan wanita dapat dipengaruhi oleh paparan timbal. Pada pria, peningkatan kadar timbal dalam darah di atas 40 $\mu\text{g}/\text{dL}$ dapat menyebabkan penurunan jumlah sperma serta perubahan lain pada volume sperma. Dampak ini juga mencakup penurunan aktivitas seperti motilitas dan perubahan morfologi sperma yang umum. Di sisi lain, masalah reproduktivitas pada wanita akibat paparan timbal mungkin lebih serius. Toksisitas timbal dapat mengakibatkan keguguran, kelahiran prematur, berat badan lahir rendah, serta masalah perkembangan yang dapat berlanjut hingga masa kanak-kanak (Putra dkk., 2023).

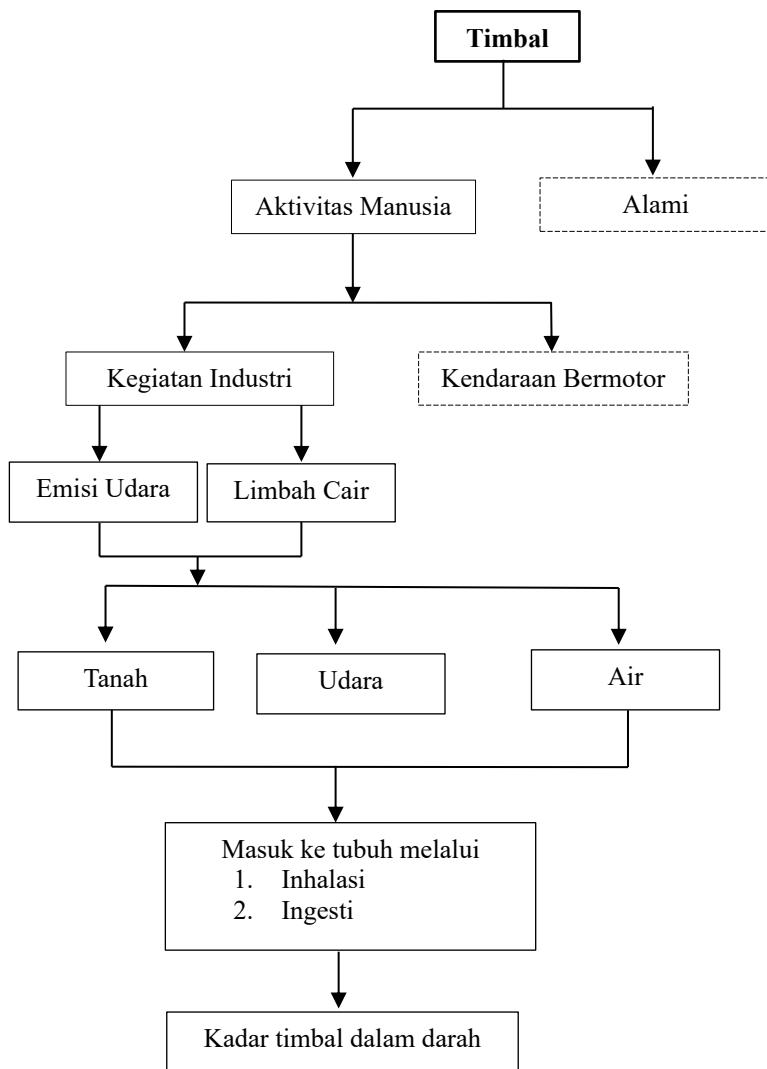
e. Pada anak-anak

Para ahli WHO menekankan pentingnya pengendalian Pb pada anak-anak, karena penelitian secara konsisten menunjukkan bahwa hal ini berdampak buruk pada sistem saraf pusat dan perkembangan. Pb sangat berbahaya bagi anak-anak di bawah usia enam tahun, kemungkinan besar karena pertumbuhan dan perkembangan otak yang cepat disertai periode kerentanan yang tinggi. Pb dapat mengganggu kemampuan belajar, merusak memori, menurunkan IQ, dan mengganggu pertumbuhan dan perkembangan. Pb telah terbukti berdampak pada kemampuan bicara, pendengaran, hiperaktivitas, kondisi saraf, ketidaknyamanan usus, sembelit, muntah, penurunan berat badan, dan nyeri otot. Pada konsentrasi darah yang tinggi, keracunan timbal dapat menyebabkan anemia, nefropati, kelumpuhan, kejang atau kematian (AE & JR, 2020).

Keracunan timbal pada anak adalah kondisi yang kompleks dan memiliki banyak sisi, yang tidak hanya memengaruhi kesehatan dan kesejahteraan anak, tetapi juga keamanan tempat tinggal, status ekonomi, keamanan kerja, dan tingkat stres keluarga. Bayi dan anak-anak berisiko lebih tinggi terkena paparan timbal dari pada orang dewasa karena ukuran tubuh mereka yang lebih kecil dan dosis racun yang tertelan yang lebih besar, kedekatan mereka dengan tanah dan debu dalam ruangan, energi dan rasa ingin tahu mereka, perilaku eksplorasi oral dan perilaku pica mereka, asupan air dan susu harian mereka yang lebih besar, dan preferensi makanan yang sangat berbeda dari orang dewasa. Penyedia layanan kesehatan anak yang bekerja di unit gawat darurat dapat memberikan penanganan medis, serta konseling dan panduan pencegahan, kepada orang tua

dari anak-anak yang menunjukkan bukti keracunan timbal akut atau kronis. Paparan anak-anak terhadap sumber kontaminasi timbal terus menjadi masalah kesehatan masyarakat yang penting (Hauptman dkk., 2017)

B. Kerangka teori



Keterangan:

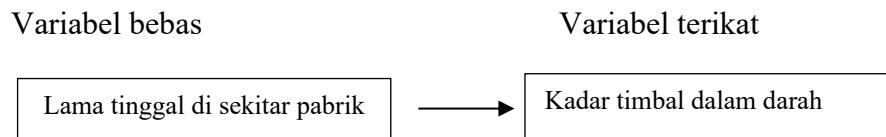
Diteliti

Tidak diteliti

Sumber: Modifikasi (Rahayu & solihat, 2018)

Gambar 2. 2 Bagan kerangka teori

C. Kerangka konsep



Gambar 2. 3 Bagan kerangka konsep

D. Hipotesis

H0 : Tidak ada hubungan antara lama tinggal di dekat pabrik industri dengan kadar timbal (Pb) dalam darah masyarakat Kampung Kaung.

H1 : Ada hubungan antara lama tinggal di dekat pabrik industri dengan kadar timbal (Pb) dalam darah masyarakat Kampung Kaung.