BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Tentang Pengemudi Ojek *Online*

2.1.1 Definisi ojek *online*

Ojek *online* merupakan layanan transportasi roda dua yang pemesanannya dilakukan melalui aplikasi pada *smartphone*. Pengguna cukup mengunduh aplikasi, membuat akun, lalu menentukan titik jemput dan antar secara digital untuk melakukan perjalanan maupun pengiriman barang. Di Indonesia, layanan ini berkembang melalui platform seperti Gojek dan Grab yang menghubungkan pengendara dan penumpang secara *real-time* (Risqi, 2022).

Dalam kajian ketenagakerjaan, ojek *online* diklasifikasikan sebagai bagian dari ekonomi berbasis platform digital dengan pola hubungan kemitraan**,** di mana pengemudi berstatus sebagai mitra dan memperoleh pendapatan berdasarkan jumlah pesanan yang berhasil diselesaikan, bukan sebagai karyawan dengan upah tetap. Pola ini menempatkan pengemudi ojek *online* dalam sektor *informal* dengan perlindungan sosial dan ketenagakerjaan yang lebih terbatas dibandingkan pekerja formal (Muhyiddin *et al.,* 2024).

Berdasarkan definisi tersebut, ojek *online* tidak hanya dipahami sebagai layanan transportasi berbasis aplikasi, tetapi juga sebagai bentuk model kerja berbasis platform yang memiliki karakteristik operasional dan mekanisme pendapatan tertentu, yang selanjutnya mempengaruhi sistem kerja pengemudinya.



Gambar 2.1.1 ilustrasi ojek online 1
Sumber **:**(Mojok.co, 2021)

2.1.2 Sistem Kerja



Gambar 2.1 Sistem Kerja 1
Sumber: Dokumentasi pribadi, 2026

Kerangka operasional sistem mitra pengemudi ojek *online* dalam bidang transportasi dan layanan pengiriman makanan dicirikan oleh fleksibilitas yang melekat, memungkinkan pengemudi untuk secara mandiri menetapkan jam kerja mereka tanpa dibatasi oleh jadwal yang telah ditentukan. Namun demikian, dalam

implementasi praktis, ada pengaturan organisasi berbasis sistem slot dalam skema hub yang mengharuskan mitra untuk memilih dan mendaftarkan diri dalam kerangka waktu yang ditentukan sesuai dengan persyaratan operasional (Dokumentasi Peneliti, 2026).

Sistem kerja fleksibel ini merupakan salah satu karakteristik utama pekerjaan berbasis platform digital atau gig economy, di mana pengemudi memiliki kebebasan dalam menentukan waktu bekerja, tetapi tetap dipengaruhi target pendapatan dan permintaan layanan (Pradana, 2024).

Berdasarkan dokumentasi akun mitra pengemudi yang digunakan peneliti, pembagian slot kerja pada area penelitian terdiri atas dua *shift,* yaitu shift siang pukul 10.00–20.00 WIB dan s*hift* malam pukul 20.00–23.59 WIB. Setiap slot memiliki durasi operasional dan target minimal pesanan yang berbeda. Pembagian sistem slot tersebut menunjukkan bahwa meskipun pengemudi memiliki fleksibilitas kerja, pola operasional tetap dapat dibedakan berdasarkan waktu kerja siang dan malam.

Pengelompokan berdasarkan *shift* kerja digunakan dalam penelitian ini karena perbedaan waktu operasional berpotensi menimbulkan variasi paparan lingkungan kerja, terutama terkait kepadatan lalu lintas, tingkat polusi udara, dan intensitas aktivitas jalan raya. Kondisi tersebut dapat memengaruhi tingkat paparan logam berat timbal (Pb) yang diterima pengemudi selama bekerja di jalan raya.

2.1.3 Durasi Kerja

Durasi kerja mengacu pada sejauh mana operator terlibat dalam kegiatan profesional dalam satu hari. Dalam konteks pengemudi taksi sepeda motor *online*, durasi kerja sering berlarut-larut karena kemampuan beradaptasi sistem kerja, yang

memungkinkan operator untuk memperpanjang jam kerja mereka di luar kerangka waktu konvensional untuk mengejar tujuan pendapatan tertentu. Peningkatan jam kerja dapat meningkatkan kemungkinan mengalami kelelahan dan memperpanjang durasi paparan polusi kendaraan di lingkungan jalan. (Wenur et al., 2025).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa mayoritas pengemudi ojek *online* bekerja lebih dari 8 jam per hari. Penelitian di Manado dan Tomohon melaporkan sebagian besar pengemudi memiliki durasi kerja lebih dari 8 jam per hari dan terdapat hubungan antara durasi kerja dengan tingkat kelelahan kerja. Penelitian lain di Jakarta Selatan juga menunjukkan bahwa durasi kerja berhubungan signifikan dengan kelelahan pada pengemudi ojek online. Selain itu, penelitian di Denpasar menemukan bahwa durasi kerja menjadi salah satu faktor yang berhubungan dengan risiko kecelakaan lalu lintas pada pengemudi ojek online.

Penelitian mengenai gangguan muskuloskeletal pada pengemudi ojek *online* juga menunjukkan bahwa sebagian besar pengemudi bekerja lebih dari 8 jam per hari, sehingga meningkatkan risiko gangguan kesehatan akibat posisi kerja berkepanjangan dan paparan lingkungan jalan raya secara terus-menerus. Dengan demikian, semakin lama durasi kerja pengemudi, maka semakin lama pula kemungkinan paparan terhadap polusi udara, termasuk paparan logam berat timbal (Pb)

2.1.4 Pola waktu Kerja Ojol (*Shift* Siang dan *Shift* Malam)

Secara formal, pengemudi ojek *online* memiliki jam kerja yang fleksibel karena tidak terikat shift seperti karyawan. Namun dalam praktik, terdapat pola yang menyerupai *shift* siang dan *shift* malam. Sebagian pengemudi lebih memilih bekerja pada jam sibuk siang hingga sore, sedangkan sebagian lainnya

memperpanjang pekerjaan hingga malam hari untuk mengejar insentif atau menghindari kemacetan (Indonesia & Bestari, 2025)

Shift siang dan malam memiliki kondisi operasional yang berbeda. Pada shift siang, pengemudi berhadapan dengan lalu lintas yang padat, suhu dan radiasi matahari yang lebih tinggi, serta tingkat interaksi yang intens dengan pengguna layanan. Sementara pada *shift* malam, lalu lintas biasanya lebih lengang tetapi visibilitas lebih rendah, kondisi lingkungan lebih sepi, dan sebagian fasilitas pendukung (seperti bengkel atau tempat istirahat) tidak beroperasi penuh *(*Luffia *et al.,* 2024).

Perbedaan ini juga menciptakan variasi risiko berdasarkan waktu**,** di mana siang hari lebih dominan pada risiko terkait paparan panas, kemacetan, dan emisi kendaraan, sedangkan malam hari lebih berkaitan dengan risiko penglihatan, keamanan, dan keterbatasan fasilitas jalan (Handari *et al.,* 2025). Dengan demikian, pembagian *shift* siang dan malam bukan hanya soal waktu bekerja, tetapi juga soal jenis paparan lingkungan yang dihadapi pengemudi selama menjalankan pekerjaannya. Kondisi tersebut akan berpengaruh terhadap tingkat dan jenis paparan lingkungan jalan raya**.**

2.1.5 Paparan Lingkungan (Jalan Raya)

Pengemudi ojek *online* termasuk kelompok pekerja *outdoor* yang beraktivitas di jalan raya dan terpapar polutan udara secara terus-menerus. Emisi kendaraan bermotor merupakan sumber utama partikulat halus (PM2.5 dan PM10) yang dapat membawa logam berat seperti timbal (Pb). Partikel tersebut berasal dari gas buang kendaraan, debu jalan, serta abrasi rem dan ban, sehingga mudah terhirup selama pengemudi berada di lalu lintas (Potter *et al.,* 2023).

Rute utama masuknya timbal Pb ke tubuh adalah melalui inhalasi**,** yaitu k

etika partikel halus terdeposit di saluran pernapasan dan diserap melalui *alveoli* paru menuju aliran darah. Selain itu, terdapat rute minor melalui ingesti**,** misalnya debu yang menempel di tangan kemudian tanpa sengaja masuk ke mulut bersama makanan atau rokok, terutama pada pekerja *outdoor* yang tidak menggunakan alat pelindung diri (Potter *et al.,* 2023).

Penelitian menunjukkan bahwa pekerja transportasi memiliki risiko paparan Pb lebih tinggi dibandingkan populasi umum karena durasi kontak dengan sumber emisi lebih panjang dan mekanisme perlindungan pribadi relatif minim. Paparan tersebut dapat terdeteksi melalui biomarker seperti kadar Pb dalam darah atau rambut (Mariadi *et al.,* 2023).

Paparan Pb memiliki dampak kesehatan yang luas, meliputi gangguan hematologis, penurunan fungsi ginjal, gangguan saraf, hingga efek kardiovaskular. Hal ini terjadi karena Pb dapat berinteraksi dengan enzim dan proses biologis penting di dalam tubuh (Potter *et al.,* 2023).

Oleh karena itu, pengemudi ojek *online* yang bekerja lebih dari 8–12 jam per hari di jalan raya tergolong kelompok rentan terhadap paparan logam berat di perkotaan, sehingga diperlukan kajian kesehatan kerja dan risiko lingkungan terhadap kelompok ini

2.2 Paparan Lingkungan pada Pekerja *Outdoor*

2.2.1 Ojol Sebagai Pekerja *Outdoor*

Pekerja outdoor (*outdoor workers*) adalah kelompok pekerja yang sebagian besar aktivitas kerjanya dilakukan di luar ruangan, sehingga mereka terpapar langsung terhadap kondisi lingkungan seperti polusi udara, suhu ekstrem, radiasi

matahari, dan zat berbahaya di lingkungan. Pekerja outdoor termasuk petani, tukang bangunan, pekerja transportasi, dan kelompok lain yang berada di luar ruangan selama jam kerja yang panjang. Karena kegiatan kerja yang berlangsung di luar ruang, kelompok ini memiliki risiko paparan polutan ambien yang lebih tinggi dibandingkan pekerja yang aktivitasnya di dalam ruang. Laporan American *Thoracic Society* menyatakan bahwa pekerja *outdoor* mengalami paparan polusi udara ambien secara terus-menerus, yang dapat menyebabkan penurunan produktivitas dan peningkatan risiko morbiditas karena kualitas udara yang buruk (American Thoracic Society, 2020; Hammer *et al.,* 2021).

2.2.2 Polusi Udara Jalan Raya

Polusi udara di jalan raya merupakan bagian dari paparan lingkungan luar ruang yang *signifikan* bagi pekerja *outdoor*, khususnya mereka yang bekerja di tepi jalan atau di area dengan lalu lintas tinggi. Polusi ini berupa partikel halus (PM2.5 dan PM10), nitrogen dioksida (NO_2), karbon monoksida (CO), dan polutan lainnya yang dilepaskan oleh kendaraan bermotor. Menurut WHO, ambien udara yang terpapar oleh masyarakat umum di kota besar sering melebihi batas aman, sehingga pekerja outdoor yang berada di jalur lalu lintas menghadapi paparan kumulatif yang lebih tinggi sepanjang jam kerja (Arina *et al.,* 2025)

Paparan partikel halus yang dihasilkan dari emisi kendaraan telah terbukti berkorelasi dengan gangguan saluran pernapasan dan peningkatan risiko penyakit kardiovaskular**,** terutama pada individu yang memiliki durasi kontak tinggi dengan polusi jalan raya. Studi di kota besar Indonesia menemukan bahwa paparan PM2.5 di sepanjang jalan raya jauh melebihi standar WHO dan lebih berisiko terhadap

kesehatan para pekerja yang berada di lokasi itu setiap hari (Lestari *et al.,* 2020; Santoso *et al.,* 2022; HEI, 2023).

2.2.3 Sumber Logam Berat Dari Transportasi

Salah satu sumber utama paparan logam berat di lingkungan outdoor berasal dari aktivitas transportasi bermotor, terutama pada wilayah dengan intensitas lalu lintas tinggi. Kendaraan bermotor tidak hanya menghasilkan emisi gas buang, tetapi juga berkontribusi terhadap pelepasan partikel logam berat ke lingkungan melalui mekanisme *non-ekshaust* seperti abrasi komponen kendaraan. Logam berat yang umum ditemukan dalam emisi transportasi meliputi timbal (Pb), kadmium (Cd), nikel (Ni), tembaga (Cu), seng (Zn), serta besi (Fe), yang terdispersi dalam bentuk partikulat halus di udara ambien (Adachi & Tainosho, 2004; Pant & Harrison, 2013; Grigoratos & Martini, 2015).ZA

a) Emisi knalpot akibat pembakaran bahan bakar fosil

Proses pembakaran bahan bakar pada kendaraan bermotor menghasilkan partikulat halus yang masih dapat mengandung residu logam berat, terutama pada kondisi pembakaran tidak sempurna. Meskipun penggunaan bahan bakar tanpa timbal telah menurunkan kontribusi Pb dari emisi knalpot, kendaraan bermotor tetap menghasilkan PM2.5 dan PM10 yang berperan sebagai media pembawa logam berat di atmosfer (Pant & Harrison, 2013).

b) Abrasi rem dan ban kendaraan

Gesekan antara kampas rem dengan cakram serta kontak ban dengan permukaan jalan menghasilkan partikel non-ekshaust yang menjadi salah satu sumber utama logam berat di lingkungan perkotaan. Kampas rem diketahui mengandung tembaga (Cu), besi (Fe), dan antimon (Sb), sedangkan keausan ban

menghasilkan seng (Zn) dalam jumlah tinggi. Studi menunjukkan bahwa emisi non-ekshaust dari rem dan ban kini menjadi kontributor dominan partikulat logam di area lalu lintas padat (Grigoratos & Martini, 2015; Wahlström et al., 2023).

c) Debu jalan yang terangkat kembali (road dust resuspension)

Aktivitas kendaraan di jalan raya menyebabkan debu jalan yang telah mengendap kembali terangkat ke atmosfer. Debu ini merupakan campuran dari tanah, partikel aspal, serta akumulasi logam berat dari emisi kendaraan dan keausan komponen otomotif. Proses resuspensi ini meningkatkan konsentrasi partikulat di udara ambien, terutama pada kawasan dengan kepadatan lalu lintas tinggi (Thorpe & Harrison, 2008; Amato *et al.,* 2014).

Partikulat yang mengandung logam berat tersebut kemudian menjadi bagian dari udara ambien yang dapat terhirup oleh manusia, khususnya individu yang beraktivitas di lingkungan jalan seperti pekerja transportasi, petugas lalu lintas, pedagang kaki lima, dan pekerja jalan. Kelompok ini memiliki tingkat paparan lebih tinggi karena kedekatan dengan sumber emisi dan durasi paparan yang lebih panjang. Studi epidemiologi menunjukkan bahwa pekerja yang terpapar polusi lalu lintas memiliki konsentrasi paparan partikulat dan logam berat yang lebih tinggi dibandingkan populasi umum, yang berpotensi meningkatkan risiko gangguan kesehatan kronis. Paparan jangka panjang terhadap partikulat tersebut dapat memicu inflamasi saluran pernapasan, stres oksidatif, serta efek toksik sistemik (Sharma et al., 2018; Li *et al.,* 2020; WHO, 2021).

2.2.4 Perbedaan Paparan Siang Vs Malam

Paparan lingkungan pada pekerja *outdoor* berbeda antara *shift* siang dan malam sehubungan dengan konsumsi bahan bakar, suhu udara, dan pola lalu lintas**.** Pada siang hari, intensitas lalu lintas biasanya lebih tinggi, sehingga konsentrasi polutan seperti PM2.5, NO_2, dan logam berat dari emisi kendaraan cenderung meningkat, terutama di jam-jam puncak ketika volume kendaraan memuncak. Sebaliknya, pada malam hari meskipun volume kendaraan menurun, variasi suhu yang lebih rendah dapat menyebabkan akumulasi polutan di permukaan tanah terutama dalam kondisi *inversi* suhu, yang memerangkap polutan dekat permukaan. Hal ini berpotensi menyebabkan paparan yang *signifikan* bagi pekerja outdoor yang bekerja pada malam hari (Potter *et al.*, 2023)

Beberapa studi juga menunjukkan bahwa suhu ekstrem di siang hari, terutama di daerah tropis, dapat memperburuk efek paparan polutan dan menambah beban fisiologis pada pekerja outdoor melalui stress panas, sehingga paparan lingkungan harus dipahami sebagai kombinasi dari kualitas udara dan kondisi lingkungan fisik seperti suhu.

2.3 Tinjauan Timbal (Pb) sebagai Zat Toksik

2.3.1 Definisi Pb

Timbal (Pb) adalah unsur logam berat yang bersifat non-esensial dan beracun bagi organisme hidup. Pb tidak memiliki fungsi biologis dalam tubuh manusia, tetapi karena sifat fisika-kimianya yang unik, logam ini tersebar luas dilingkungan dan menjadi polutan penting yang dapat mencemari udara, tanah, dan air. Pb termasuk salah satu logam berat yang paling umum ditemukan sebagai kontaminan lingkungan akibat aktivitas antropogenik seperti emisi kendaraan,

industri, dan pemakaian bahan bakar fosil. Pb sangat persisten dan akumulatif di lingkungan sehingga berpotensi menimbulkan risiko kesehatan jangka panjang bagi manusia (Generalova *et al.,* 2025). Dengan demikian, Pb dipahami sebagai logam berat beracun yang tidak dibutuhkan tubuh, sehingga penting untuk memahami terlebih dahulu sifat toksiknya.



Gambar 2.3 Logam Berat (Pb) 1
Sumber: (Survey, 2026)

2.3.2 Sifat dan Mekanisme Toksik Timbal (Pb)

Pb merupakan logam berat dengan sifat toksik akut dan kronis yang memengaruhi berbagai sistem organ. Pb dapat menggantikan ion penting dalam proses biokimia, memicu stres oksidatif, dan mengganggu fungsi enzim seluler. Logam ini juga memiliki kemampuan untuk menumpuk dalam jaringan tubuh, terutama di tulang, yang dapat menjadi cadangan kadar Pb dalam jangka panjang (Generalova *et al.,* 2025).

Sifat toksik Pb tanpa ambang aman yang jelas menunjukkan bahwa paparan sekecil apa pun dapat mengakibatkan efek kesehatan, sehingga penting untuk mengidentifikasi sumber-sumber paparan Pb yang umum terjadi pada manusia.

2.3.3 Sumber Paparan Timbal (Pb) di Lingkungan

Timbal (Pb) merupakan salah satu logam berat yang banyak ditemukan di lingkungan akibat aktivitas manusia. Keberadaannya di udara, tanah, dan debu jalan terutama dipengaruhi oleh kegiatan industri, transportasi, serta pengelolaan limbah.

Dalam konteks lingkungan perkotaan, akumulasi Pb tidak terjadi secara tunggal, melainkan berasal dari berbagai sumber yang saling berkontribusi dan kemudian terdispersi dalam bentuk partikulat halus di udara ambien. Menurut Simatupang *et al*. (2024) serta WHO (2021), sumber utama paparan Pb dapat diklasifikasikan menjadi emisi kendaraan bermotor, debu jalan dan polusi udara ambien, serta produk industri dan limbah.

1. Emisi kendaraan bermotor

Emisi kendaraan bermotor merupakan salah satu sumber paling signifikan dalam kontribusi Pb di lingkungan perkotaan, terutama di area dengan kepadatan lalu lintas yang tinggi. Meskipun penggunaan bensin tanpa timbal telah menurunkan kontribusi Pb dari proses pembakaran bahan bakar, keberadaan Pb di lingkungan jalan raya masih tetap ditemukan melalui berbagai mekanisme tidak langsung.

Sumber utama Pb dari kendaraan bermotor tidak lagi didominasi oleh emisi knalpot, tetapi lebih banyak berasal dari emisi non-ekshaust, yaitu partikel yang tidak berasal dari gas buang. Emisi ini meliputi:

1) Abrasi kampas rem, yang menghasilkan partikel halus mengandung logam seperti tembaga (Cu), besi (Fe), dan antimon (Sb)
2) Keausan ban, yang berkontribusi terhadap pelepasan seng (Zn) dan partikel mikro lainnya
3) Resuspensi debu jalan, yaitu proses terangkatnya kembali partikel yang telah mengendap di permukaan jalan akibat pergerakan kendaraan Partikel-partikel tersebut kemudian bercampur dengan debu lingkungan dan terdispersi ke udara dalam bentuk partikulat halus (PM10 dan PM2.5).

Ukuran partikel yang kecil memungkinkan logam berat terhirup langsung oleh manusia dan masuk ke sistem pernapasan. Studi menunjukkan bahwa kontribusi emisi non-ekshaust kini menjadi faktor dominan dalam polusi partikulat di kawasan perkotaan modern (Grigoratos & Martini, 2015; Pant & Harrison, 2013).

Dalam konteks lingkungan kerja outdoor seperti jalan raya, emisi kendaraan menjadi sumber paparan yang paling relevan karena pekerja berada dalam jarak dekat dengan sumber emisi dan terpapar dalam durasi waktu yang panjang setiap hari.

2. Debu jalan dan polusi udara ambien

Debu jalan merupakan campuran kompleks dari berbagai material, termasuk tanah, partikel aspal, residu kendaraan, serta logam berat yang berasal dari aktivitas lalu lintas. Debu ini berfungsi sebagai media akumulasi polutan yang terus mengalami penumpukan seiring waktu.

Pada saat kendaraan melintas, terjadi proses yang disebut road dust resuspension, yaitu pengangkatan kembali debu yang telah mengendap ke udara akibat turbulensi dan pergerakan kendaraan. Proses ini menyebabkan peningkatan konsentrasi partikulat di udara ambien, terutama di wilayah dengan lalu lintas padat dan ventilasi udara yang terbatas.

Logam berat seperti Pb dapat melekat pada partikel debu ini dan bertahan di lingkungan dalam waktu lama. Selain itu, debu jalan juga dapat berpindah ke tubuh manusia melalui inhalasi langsung atau kontak tidak langsung, misalnya melalui tangan, pakaian, atau makanan yang terkontaminasi.

Penelitian menunjukkan bahwa debu jalan merupakan salah satu media penting dalam distribusi logam berat di lingkungan perkotaan karena kemampuannya mengakumulasi berbagai sumber polutan secara simultan (Amato *et al.,* 2014).

3 Produk industri dan limbah

Selain sumber transportasi, Pb juga berasal dari aktivitas industri dan pengelolaan limbah. Sumber ini meliputi cat berbasis timbal yang masih terdapat pada bangunan lama, baterai bekas, serta proses peleburan logam dan industri manufaktur tertentu.

Pada cat lama, Pb digunakan sebagai bahan campuran untuk meningkatkan daya tahan dan warna. Ketika cat mengalami degradasi, partikel Pb dapat terlepas ke lingkungan dan menjadi bagian dari debu rumah maupun debu lingkungan luar. Sementara itu, baterai bekas dan limbah industri logam dapat melepaskan Pb ke tanah dan air apabila tidak dikelola dengan baik.

Aktivitas peleburan logam juga menjadi sumber penting karena proses pemanasan dapat melepaskan uap dan partikel logam berat ke udara. Partikel tersebut kemudian mengalami deposisi atmosfer dan kembali mencemari lingkungan permukaan (WHO, 2021).

Dalam konteks lingkungan kerja outdoor seperti jalan raya, ketiga sumber tersebut saling berkontribusi terhadap peningkatan paparan Pb. Namun, sumber yang paling dominan adalah emisi kendaraan bermotor dan debu jalan, karena keduanya berada langsung di lokasi aktivitas kerja dan terus-menerus terdispersi di udara.

Kelompok pekerja seperti petugas lalu lintas, pekerja jalan, pedagang kaki lima, dan pengemudi transportasi memiliki tingkat risiko paparan yang lebih tinggi dibandingkan populasi umum. Hal ini disebabkan oleh:

1) Kedekatan langsung dengan sumber emisi
2) Durasi paparan harian yang panjang
3) Minimnya perlindungan terhadap partikulat udara
4) Akumulasi paparan jangka panjang

Paparan kronis terhadap Pb dalam bentuk partikulat halus berpotensi meningkatkan beban logam berat dalam tubuh, terutama melalui inhalasi dan ingesti tidak langsung. Kondisi ini menjadi perhatian penting dalam kajian kesehatan lingkungan karena Pb bersifat toksik meskipun pada dosis rendah dan dapat terakumulasi dalam jaringan tubuh..

2.3.4 Jalur Masuk Ke Tubuh

Timbal dapat memasuki tubuh manusia terutama melalui:

1. Inhalasi, terjadi ketika partikel timbal (Pb) yang terdapat di udara ambien terhirup melalui saluran pernapasan. Partikel ini umumnya berukuran halus (PM10 dan PM2.5) sehingga dapat mencapai bagian terdalam paru, yaitu alveoli. Pada tahap ini, sebagian Pb dapat larut dan masuk ke aliran darah melalui membran alveolar. Studi menunjukkan bahwa partikel logam berat di udara perkotaan banyak terikat pada partikulat halus hasil emisi kendaraan bermotor, termasuk dari proses pembakaran, abrasi rem, dan debu jalan. Kondisi ini meningkatkan potensi paparan inhalasi terutama pada individu yang bekerja di ruang terbuka dengan intensitas lalu lintas tinggi

(Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2021; World Health Organization, 2024).

2. Ingesti, Ingesti terjadi ketika partikel Pb masuk ke tubuh melalui sistem pencernaan akibat tertelannya debu, makanan, atau tangan yang terkontaminasi. Mekanisme ini sering disebut sebagai *"hand-to-mouth exposure",* yaitu perpindahan partikel dari permukaan yang terkontaminasi ke mulut tanpa disadari. Pada lingkungan kerja seperti jalan raya, terminal, atau area lalu lintas padat, debu yang mengandung Pb dapat menempel pada tangan, pakaian, atau makanan. Partikel tersebut kemudian masuk ke sistem pencernaan dan diserap di saluran gastrointestinal (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2021)

Jalur inhalasi dan ingesti ini sangat penting dipahami karena setelah masuk ke tubuh, Pb akan didistribusikan melalui sistem peredaran darah, yang menjadi subjek pembahasan pada subbab berikutnya.

2.3.5 Distribusi Pb Dalam Darah

Setelah terpapar dan masuk melalui inhalasi atau ingesti, Pb pertama kali merasuki peredaran darah**.** Di dalam darah, Pb sebagian besar terikat pada eritrosit, dan kadar Pb darah (*Blood Lead Level / BLL*) digunakan sebagai indikator klinis paparan Pb akut atau terkini (Simatupang *et al.*, 2024).

Namun, darah hanya mencerminkan sebagian kecil dari total Pb tubuh. Sebagian besar Pb akan dipindahkan ke tulang dan jaringan lunak seperti ginjal dan hati sebagai tempat penyimpanan jangka panjang (Generalova *et al.,* 2025) Distribusi Pb ke berbagai jaringan tubuh ini menjadi dasar bagi berbagai efek kesehatan yang akan dibahas selanjutnya.

2.3.6 Efek Kesehatan Pb dalam Darah

Paparan timbal (Pb) yang masuk ke dalam darah tidak hanya menunjukkan tingkat paparan, tetapi juga berkaitan dengan berbagai efek kesehatan sistemik. Beberapa aspek yang umum dibahas dalam literatur adalah biomarker paparan, gangguan darah, tekanan darah/hipertensi, dan gangguan fungsi ginjal. Transisi ini membawa pembahasan ke bagian mengenai peran darah dalam proses toksisitas Pb**.**

2.3.7 Pb Dalam Darah Indikator Paparan (Biomarker)

Kadar Pb dalam darah (*Blood Lead Level / BLL*) merupakan indikator utama paparan Pb karena darah berfungsi sebagai media distribusi Pb dari rute masuk ke jaringan lain. BLL sering diukur dalam studi epidemiologis untuk menilai paparan baik pada populasi umum maupun kelompok kerja yang terpapar lingkungan atau pekerjaan, seperti pekerja transportasi dan industri. Penelitian pada kelompok pengemudi menunjukkan bahwa kadar Pb dalam darah dapat digunakan sebagai indikator paparan timbal akibat lingkungan kerja dan menunjukkan hubungan dengan faktor paparan jalan raya (Mariadi *et al.,* 2023).

Pemahaman BLL penting sebelum membahas bagaimana Pb memengaruhi parameter darah, seperti yang dijelaskan selanjutnya.

2.3.8 Gangguan Hematologi

Pb diketahui mengganggu *hematopoiesis* dan fungsi darah, terutama melalui efek pada sintesis hemoglobin. Pb menghambat enzim penting seperti ferrochelatase**,** yang berperan dalam tahap akhir pembentukan heme, sehingga dapat menyebabkan anemia dan perubahan parameter hematologi lainnya. Studi pada populasi yang terpapar Pb menunjukkan bahwa paparan timbal dikaitkan

dengan gangguan hematologi, termasuk penurunan hemoglobin dan bentuk eritrosit abnormal (Upadhyay *et al.,* 2025).

Selain itu, Pb dapat menyebabkan stres oksidatif pada eritrosit, mempercepat kerusakan sel darah, dan berdampak negatif pada produksi sel darah merah sehingga menurunkan kapasitas pengikatan oksigen.

Transisi ini membuka pembahasan mengenai efek Pb pada sistem kardiovaskular, khususnya tekanan darah.

2.3.9 Tekanan Darah Hipertensi

Banyak studi epidemiologis melaporkan hubungan antara kadar Pb darah dan tekanan darah / hipertensi. Analisis data populasi besar menunjukkan bahwa peningkatan kadar Pb dalam darah berkaitan dengan peningkatan tekanan darah sistolik dan diastolik, serta risiko hipertensi meskipun pada kadar Pb yang relatif rendah (Tsoi *et al.,* 2021).

Hasil ini konsisten dengan temuan bahwa Pb dapat memengaruhi fungsi endotel dan sistem vaskular melalui mekanisme seperti stres oksidatif dan gangguan regulasi ion, sehingga berkontribusi pada peningkatan resistensi pembuluh darah dan tekanan darah.

Setelah membahas dampak Pb pada tekanan darah, ada pula bukti bahwa Pb secara langsung merusak fungsi ginjal, yang merupakan organ target berikutnya dalam toxicokinetik Pb.

2.3.10 Nefrotoksisitas

Paparan Pb kronis berkaitan dengan penurunan fungsi ginjal dan tanda-tanda nefrotoksisitas. Bukti epidemiologis menunjukkan bahwa individu dengan kadar Pb darah yang lebih tinggi cenderung menunjukkan bukti kerusakan ginjal

seperti glomerular sclerosis, tubulointerstitial fibrosis, dan peningkatan biomarker kerusakan ginjal sebelum munculnya gagal ginjal klinis (Upadhyay et al., 2025)

Kajian sistematis juga menunjukkan hubungan antara paparan kronis Pb dan biomarker proximal tubule injury seperti *N-acetyl-β-D-glucosaminidase* (NAG) dan peningkatan *cystatin-C*, yang mengindikasikan gangguan fungsi filtrasi ginjal bahkan sebelum manifestasi penyakit ginjal klinis (Upadhyay et al., 2025)