

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

1.1 Transportasi

Transportasi adalah proses pemindahan barang atau manusia dari tempat asal ke tempat tujuan. Transportasi merupakan sarana untuk mencapai tujuan tertentu, yaitu mengatasi kesenjangan jarak dan waktu. Jasa transportasi merupakan faktor penting dalam memproduksi, perdagangan, pertanian, serta kegiatan ekonomi yang lain. Manusia sangat membutuhkan transportasi untuk memenuhi berbagai kebutuhan hidup, umumnya berhubungan dengan produksi barang dan jasa. Transportasi memiliki peran penting dalam pembangunan serta pengembangan infrastruktur area perkotaan (Tumewu et al., 2021).

1.1.1 Jenis Transportasi

A. Transportasi Pribadi

Transportasi pribadi merujuk pada penggunaan kendaraan yang dimiliki secara individu untuk memenuhi kebutuhan mobilitas harian, seperti sepeda motor atau mobil yang dikemudikan oleh pemiliknya sendiri. Jenis transportasi ini biasanya dipilih karena memberikan fleksibilitas waktu, kenyamanan, dan efisiensi langsung tanpa perlu menunggu jadwal angkutan umum. Dalam kajian mengenai transportasi, pemanfaatan kendaraan pribadi sering kali dipengaruhi oleh aspek biaya, tingkat kenyamanan, dan waktu tempuh yang lebih cepat dari angkutan umum, meskipun hal ini bisa mengakibatkan kemacetan lalu lintas (Karma *et al.*, 2024).

B. Transportasi Umum

Transportasi umum merupakan moda transportasi yang disediakan untuk melayani masyarakat secara luas dalam kegiatan perpindahan manusia dari suatu tempat menuju tempat lain selain dengan kendaraan pribadi, contoh seperti bus, angkutan kota (angkot), taksi, dan kereta yang berperan sebagai alternatif mobilitas untuk meningkatkan aksesibilitas, efisiensi perjalanan, serta mendukung sistem transportasi perkotaan yang terintegrasi (Nur *et al.*, 2024).

C. Transportasi *Online*

Transportasi *online* merupakan inovasi dari moda transportasi yang menggabungkan kendaraan dengan sistem pemesanan melalui aplikasi digital (smartphone). Sistem ini memanfaatkan teknologi informasi yang memungkinkan masyarakat memesan jasa angkutan secara real-time, terjadwal, dan berbasis lokasi, sehingga menjadikan layanan lebih efisien, mudah diakses, dan fleksibel. Transportasi *online* biasa ditemui dalam bentuk ojek online dan taksi online yang kini menjadi pilihan banyak orang karena kecepatan layanan dan kemudahan transaksi digital. Transportasi *online* tidak hanya menyediakan jasa angkutan orang, tetapi juga layanan lain seperti pengiriman barang atau pesan antar makanan dalam satu platform aplikasi. Munculnya transportasi online juga telah mengubah pola pemilihan moda transportasi masyarakat, menjadi alternatif setelah kendaraan pribadi dan transportasi umum (Kurniawan *et al.*, 2020).

1.1.2 Dampak Transportasi Dalam Kehidupan Masyarakat

Transportasi memainkan peran penting dalam kehidupan masyarakat karena membantu orang berpindah dan mendistribusikan barang serta jasa dengan lebih efisien, sehingga mendukung pertumbuhan ekonomi dan meningkatkan kegiatan sehari-hari, terutama di tengah semakin pesatnya perkembangan kota. Jalan raya menjadi pilihan utama karena lebih fleksibel, mudah dicapai, dan bisa sampai ke berbagai tempat. Meski begitu, aktivitas transportasi juga membawa dampak negatif, seperti getaran dari kendaraan yang bisa berpengaruh pada kesehatan manusia, lingkungan, serta menyebabkan kerusakan pada infrastruktur jika terjadi terus-menerus (Handayani *et al.*, 2025).

1.1.3 Dampak transportasi terhadap lingkungan

Transportasi, terutama kendaraan bermotor di darat, memberikan dampak yang besar bagi lingkungan karena menjadi penyumbang utama pencemaran udara area perkotaan. Aktivitas yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor melepaskan emisi gas buang seperti karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), hidrokarbon, dan partikel lain yang dapat menyebabkan penurunan kualitas udara di sekitar kita. Peningkatan jumlah kendaraan yang tidak diimbangi dengan pengelolaan transportasi yang baik menyebabkan akumulasi zat pencemar di atmosfer, yang berakibat pada kerusakan lingkungan dan kenyamanan masyarakat di sekitar jalan dan pusat aktivitas transportasi. Paparan jangka panjang terhadap polutan udara yang berasal dari sektor transportasi terkait langsung dengan meningkatnya

risiko penyakit pernapasan, masalah kardiovaskular, dan berbagai penyakit kronis lainnya. Di sisi lain, emisi gas rumah kaca dari kendaraan bermotor juga memiliki peran dalam pemanasan global dan perubahan iklim (Faradila *et al.*, 2025).

1.2 Ojek Online



Gambar 2.1 Ojek Online (Fathulrahman A, 2022)

Layanan ojek *online* merupakan sebuah opsi transportasi yang memanfaatkan teknologi digital, menggunakan sepeda motor sebagai kendaraan pokok, di mana pelanggan dapat memesan lewat aplikasi di ponsel pintar mereka. Dalam sistem ini, pelanggan bisa memesan kendaraan secara *online* dengan menyebutkan titik jemput dan tujuan, kemudian sistem akan mencocokkan pelanggan dengan pengemudi yang ada di sekitar. Kemunculan ojek *online* timbul akibat pesatnya perkembangan teknologi informasi yang memadukan layanan angkutan dengan sistem digital guna menambah kemudahan dan efisiensi masyarakat. Secara garis besar, ojek *online* bisa dianggap sebagai pembaharuan dari transportasi umum konvensional yang kini dikelola secara *online*, baik untuk pemesanan maupun pembayaran. Skema ini memberikan kepastian harga, perkiraan durasi tempuh, serta kemudahan mendapat layanan tanpa perlu mencari kendaraan di jalanan secara langsung.

Beberapa contoh ojek *online* yang sering dipakai di Indonesia adalah Gojek, Grab, Shopeefood yang tidak hanya menyediakan jasa angkut orang, namun juga menghadirkan layanan tambahan seperti pengiriman makanan, kurir paket, dan pembayaran digital. Kehadiran ojek *online* ini menjadikan pilihan alternatif selain kendaraan pribadi dan umum, khususnya di wilayah perkotaan yang tingkat pergerakannya sangat padat (Handayani *et al.*, 2025).

1.2.1 Sistem kerja ojek *online*

Sistem kerja layanan ojek *online* itu adalah model pekerjaan berbasis aplikasi digital yang mempertemukan penumpang dengan *driver* langsung, di mana pemesanan, pemberian tugas, penunjuk arah, sampai pembayaran semua diurus lewat aplikasi. Dalam sistem ini, para *driver* bebas mengatur waktu kerjanya sebab mereka tidak dipatok jam kerja pasti, namun bisa memutuskan sendiri kapan mau mulai dan selesai bekerja dengan menyalakan atau mematikan aplikasi berdasarkan keperluan diri sendiri dan situasi di jalanan. Walaupun terlihat santai, dalam kenyataannya sistem kerja ojek *online* seringkali membuat *driver* harus bekerja dalam waktu yang lumayan lama, khususnya kalau ingin dapat penghasilan yang maksimal. Lamanya jam kerja sehari sangat dipengaruhi oleh seberapa banyak permintaan penumpang, waktu ramai (seperti pagi dan petang), persaingan antar *driver*, dan aturan bonus dari penyedia aplikasi, alhasil kebebasan waktu kerja ini bisa menyebabkan cara kerja yang padat dan terus menerus (Farida, 2020).

1.2.2 *Driver ojek online*

Driver ojek online merupakan pengendara motor yang menawarkan jasa angkutan penumpang atau pengiriman barang lewat aplikasi digital, beroperasi sebagai mitra perusahaan platform *online* tanpa status karyawan tetap, dengan pemesanan layanan bisa dilakukan langsung saat itu juga menggunakan teknologi internet (Pasya *et al.*, 2025).

A. Karakteristik pekerjaan *driver ojek online*

Pekerjaan *driver ojek online* memiliki ciri unik dalam dunia ekonomi digital, di mana mereka berperan sebagai mitra mandiri dengan kebebasan dalam menentukan jam kerja serta kontrol terhadap aktivitas sehari-hari. Namun mereka harus menghadapi ketidakpastian terkait penghasilan dan tekanan untuk meningkatkan jam kerja demi memenuhi target bonus yang ditetapkan oleh platform. Jenis hubungan kerja ini juga diatur oleh sistem penilaian dari pelanggan serta teknologi aplikasi, yang bisa menambah tekanan kerja meskipun tidak memberikan perlindungan ketenagakerjaan formal seperti asuransi ataupun jaminan sosial (Pasya *et al.*, 2025).

B. Faktor lama kerja harian

Driver ojek online sering kali menghadapi jam kerja yang sangat panjang setiap harinya, di mana mereka melaporkan bahwa mereka bekerja rata-rata hingga sekitar 14 jam sehari untuk mencapai target pendapatan dan insentif yang ditetapkan oleh aplikasi, meskipun sistem kerja seharusnya memberikan kebebasan dalam waktu, namun tuntutan

kinerja ini malah mendorong mereka untuk terus bekerja lebih lama dari jam kerja biasa agar bisa memperoleh penghasilan yang memadai (Shafira *et al.*, 2025).

C. Risiko kesehatan

Resiko kesehatan dari jam kerja yang terlalu lama dan tuntutan untuk selalu bergerak aktif meningkatkan kemungkinan risiko kesehatan dan keselamatan bagi *driver* ojek *online*. Hal ini disebabkan oleh tingginya tingkat mobilitas, terpapar stres, dan kemungkinan kelelahan baik secara fisik maupun mental akibat waktu kerja yang panjang tanpa adanya perlindungan ketenagakerjaan yang memadai. Sehingga, suasana kerja semacam ini bisa memberikan dampak buruk bagi kesehatan jangka panjang para *driver* ojek *online* (Shafira *et al.*, 2025).

1.3 Cemarkan

Cemarkan adalah kehadiran suatu zat, organisme, atau komponen yang tidak diinginkan di dalam suatu media (seperti makanan, air, dan lingkungan) serta hadir pada konsentrasi yang tidak sesuai sehingga menimbulkan dampak negatif pada kesehatan manusia (Rietjens *et al.*, 2025).

1.3.1 Jenis-jenis cemarkan

A. Cemarkan udara

Pencemarkan udara terjadi akibat berbagai sumber emisi yang melepaskan bahan-bahan berbahaya ke udara, termasuk gas berbahaya dan partikel kecil yang mengandung logam berat seperti timbal, kadmium, kromium, dan lainnya. Polusi udara yang terkait dengan logam

berat di kota-kota besar terutama berasal dari emisi kendaraan, pembakaran bahan bakar fosil, dan kegiatan industri, yang semuanya menambahkan polutan ke atmosfer dan dapat menimbulkan ancaman kesehatan serius ketika terhirup oleh manusia (Truong *et al.*, 2022).

B. Cemaran lingkungan

Pencemaran lingkungan terjadi ketika zat-zat yang berbahaya dilepaskan ke dalam elemen-elemen seperti udara, air, dan tanah, yang bisa mengancam kesehatan manusia serta kehidupan tumbuhan, hewan, dan kestabilan ekosistem secara keseluruhan. Penyebab utama pencemaran ini berasal dari kegiatan manusia seperti emisi dari kendaraan, industri dan pabrik, limbah rumah tangga, serta pembakaran sampah, yang menghasilkan polutan seperti gas buang, partikel kecil, limbah cair dari industri, dan sampah padat yang mencemari lingkungan, serta juga dari sumber alami seperti letusan gunung berapi atau kebakaran hutan (Najwa *et al.*, 2025).

1.3.2 Dampak cemaran terhadap kesehatan

Dampak dari polusi yang dihasilkan oleh bahan berbahaya dari sektor industri dan kendaraan bermotor dapat memberikan efek yang sangat besar pada kesehatan manusia. Peningkatan peluang terkena infeksi saluran pernapasan, baik yang bersifat akut maupun kronis, gangguan pada sistem kardiovaskular, bahkan bisa berujung pada kematian. Polusi udara di kawasan perkotaan berkontribusi pada masalah pernapasan seperti asma dan bronkitis, serta penyakit jantung dan berbagai komplikasi kesehatan lainnya, khususnya pada kalangan yang lebih rentan seperti anak-anak dan lanjut

usia. Hal tersebut menunjukkan cemaran adalah suatu masalah kesehatan masyarakat yang serius (Najwa *et al.*, 2025).

1.4 Rokok



Gambar 2.2 Rokok (Dinkes, 2024)

Menurut peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 28 Tahun 2013, rokok adalah barang dari tembakau yang memang dibuat supaya bisa dibakar, diisap, dan juga dihirup. Ini mencakup rokok kretek, cerutu, atau bentuk lain yang asalnya dari tanaman tembakau, serta jenis lain yang dibuat secara buatan, di mana asapnya mengandung zat nikotin dan juga tar, serta tambahan zat lain (Sari *et al.*, 2024).

1.4.1 Kandungan logam berat dalam rokok

Rokok memiliki berbagai jenis logam berat yang berbahaya, berasal dari tanaman tembakau yang menyerap logam dari tanah serta bahan tambahan dan proses pembuatan, termasuk kadmium, timbal, kromium, tembaga, kobalt, mangan, dan seng; logam-logam ini terakumulasi dalam tembakau dan juga terdapat dalam asap rokok yang dihirup oleh perokok, sehingga menjadi salah satu jalur paparan logam berat bagi manusia melalui proses pernapasan saat merokok. Penelitian mengenai kadar logam berat

pada berbagai jenis rokok menunjukkan bahwa kandungan kadmium dan timbal sering ditemukan pada tingkat yang signifikan dalam tembakau dan asap rokok, yang membawa implikasi terhadap risiko kesehatan karena sifat toksik logam-logam tersebut dan potensi akumulasinya dalam jaringan tubuh (Hussain *et al.*, 2024).

1.4.2 Perokok aktif

Secara ilmiah, seorang perokok aktif adalah orang yang secara sengaja menggunakan produk tembakau berupa rokok dengan menghirup asapnya langsung ke dalam sistem pernapasan, baik itu dilakukan setiap hari maupun hanya kadang-kadang. Perokok aktif berbeda dengan perokok pasif karena asap yang dihirup berasal dari rokok yang mereka bakar dan hisap sendiri, bukan asap yang ada di sekitar mereka (Candra *et al.*, 2021).

1.4.3 Perokok pasif

Perokok pasif atau orang yang terpapar asap rokok tanpa merokok sendiri, adalah mereka yang tanpa sengaja menghirup asap yang dikeluarkan oleh orang yang sedang merokok di dekatnya. Akibatnya, zat kimia berbahaya dari tembakau seperti nikotin, tar, dan partikel kecil bisa masuk ke tubuh mereka meskipun mereka tidak pernah merokok (Ambarwati *et al.*, 2024).

1.4.4 Dampak merokok

Dampak dari kebiasaan merokok memiliki jangkauan yang sangat luas dan telah terbukti secara ilmiah mempengaruhi hampir semua sistem dalam tubuh manusia. Asap yang dihasilkan oleh rokok mengandung

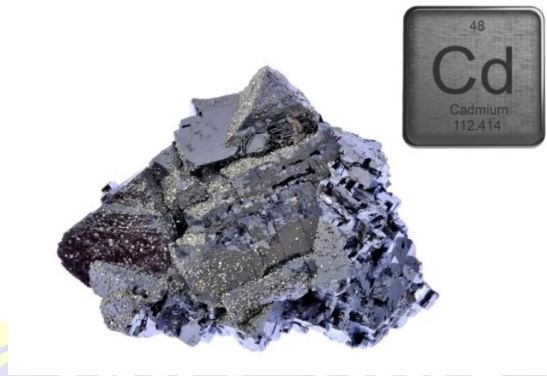
banyak zat berbahaya seperti nikotin, tar, karbon monoksida, dan senyawa penyebab kanker yang dapat merusak sel serta jaringan tubuh. Paparan terhadap zat-zat tersebut meningkatkan kemungkinan munculnya berbagai penyakit berbahaya, termasuk kanker terutama kanker paru, penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), masalah pada sistem pernapasan, penyakit jantung koroner, dan stroke. Selain itu, sifat adiktif dari nikotin menyebabkan ketergantungan, yang membuat individu kesulitan untuk meninggalkan kebiasaan merokok. Bukan hanya mempengaruhi perokok yang aktif, merokok juga berdampak buruk bagi mereka yang terpapar asap rokok serta lingkungan sekitarnya. Asap yang dihirup oleh individu lain dapat meningkatkan kemungkinan mengalami masalah pernapasan, penyakit kardiovaskular, dan gangguan kesehatan pada ibu hamil serta anak-anak. (Suryoadji *et al.*, 2024).

A. Pengobatan dan pencegahan

Pengobatan dan pencegahan efek merokok bertujuan pada upaya berhenti merokok yang sudah terbukti berhasil menurunkan risiko penyakit kronis, seperti penyakit jantung, kanker, dan gangguan pernapasan. Cara ini melibatkan konseling perilaku, pengobatan dengan bahan pengganti nikotin, obat bupropion, dan varenicline, serta kombinasi dari semua metode tersebut. Tujuannya adalah untuk membantu mengurangi gejala ketika seseorang berhenti merokok dan meningkatkan kemungkinan untuk benar-benar berhenti merokok. Pendekatan ini berjalan dengan meningkatkan semangat, mengubah

kebiasaan merokok, serta memberikan dukungan emosional dan medis yang terus-menerus (Onwuzo *et al.*, 2024).

1.5 Kadmium



Gambar 2.3 Kadmium (Vehgro, 2024)

Kadmium (Cd) adalah unsur logam berat yang berpotensi beracun dengan nomor atom 48, yang secara alami muncul di alam dalam jumlah kecil, namun tidak memiliki fungsi fisiologis dalam tubuh manusia dan dapat berbahaya saat terpapar. Dari sudut pandang ilmiah, kadmium diketahui memiliki sifat bioakumulatif dan rentang waktu paruh biologis yang sangat lama, sehingga dapat terakumulasi, terutama di ginjal dan hati selama bertahun-tahun. Paparan kadmium, baik melalui konsumsi makanan, air, lingkungan industri, maupun asap rokok, yang menyebabkan berbagai dampak negative pada kesehatan, seperti kerusakan fungsi ginjal, gangguan metabolisme tulang, dan peningkatan risiko kanker. Maka dari itu, kadmium dianggap sebagai masalah yang signifikan dalam kesehatan lingkungan dan toksikologi (Qu & Zheng, 2024).

1.5.1 Sumber Kadmium

A. Alami

Kadmium (Cd) merupakan jenis logam berat yang ditemukan di kerak bumi beriringan dengan bijih tembaga, seng, dan timbal. Logam ini terdapat dalam jumlah yang relatif kecil, mencapai sekitar 0,15-0,2 µg/g (Yuniar, 2020). Kadar kadmium menunjukkan kondisi kehadiran kadmium di dalam tanah di suatu tempat. Namun, kadar kadmium di tanah dapat meningkat melalui proses natural seperti pelapukan batu, letusan vulkanik, debu angin, aerosol laut, kebakaran hutan, dan erosi. Menurut laporan dari Program Lingkungan PBB (UNEP), diperkirakan sekitar 150 hingga 2600 ton kadmium dibebaskan ke lingkungan setiap tahunnya. Sekitar 0,25 juta kg Cd berasal dari debu angin, 0,5 juta kg dari letusan gunung berapi, 0,01 juta kg akibat kebakaran hutan, dan 0,002 juta kg dari aerosol laut. Kehadiran kadmium dalam berbagai tipe batuan tercatat berkisar antara 0,006 hingga 8,4 ppm setiap tahunnya (Khan *et al.*, 2022).

B. Industri

Kadmium (Cd) yang mencemari lingkungan sebagian besar berasal dari aktivitas industri yang dilakukan oleh manusia, terutama dari proses peleburan dan pemurnian logam non-ferrous seperti seng, timbal, dan tembaga, di mana Cd terdapat sebagai zat pengotor dan dilepaskan selama pengolahan mineral tersebut. Di samping itu, sektor pembuatan baterai nickel-cadmium (Ni-Cd), elektroplating, pigmen untuk cat dan plastik, serta stabilisator plastik juga menambah emisi Cd melalui limbah

padat, udara, dan air yang dibuang tanpa pengolahan yang layak. Emisi Cd dari aktivitas industri ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sumber alami dan berperan dalam peningkatan konsentrasi Cd di udara, tanah, serta sumber air di sekitar area industri, sehingga menjadi salah satu penyebab utama paparan lingkungan yang berisiko bagi kesehatan manusia (Khan *et al.*, 2022)

C. Transportasi

Salah satu penyebab utama keberadaan kadmium (Cd) berasal dari sektor transportasi. Sektor transportasi memberikan kontribusi pada keberadaan kadmium (Cd) melalui emisi dari gas knalpot kendaraan bermotor dan aktivitas terkait transportasi. Kendaraan bermotor, khususnya yang menggunakan bahan bakar fosil seperti bensin dan solar, melepaskan kadmium (Cd) (Fitri, 2021). Proses pembakaran tersebut dapat mengeluarkan partikel kadmium ke udara. Aktivitas transportasi juga berkontribusi pada keberadaan kadmium (Cd) melalui pelumas, serta komponen kendaraan yang mengalami keausan, seperti ban dan rem yang mengandung logam, serta debu dari jalan yang mengandung kadmium (Cd). Saat terjadi pelapukan atau korosi, kadmium dapat lepas ke dalam lingkungan (Khan *et al.*, 2022).

1.5.2 Toksisitas Kadmium

Kadmium (Cd) adalah logam berat non-esensial yang dikenal sebagai bahan berbahaya bagi sistem kehidupan. Senyawa ini dapat mengurangi kadar glutathione (GSH) dalam jaringan, menghambat aktivasi beberapa enzim antioksidan seperti Cu/Zn-dismutase, mangan-SOD, dan

katalase (CAT), serta memicu keadaan stres oksidatif. Selain itu, kadmium turut menyebabkan pengurangan mineral tulang melalui interaksinya yang langsung dengan osteosit, yang mengganggu metabolisme kalsium, kolagen, dan vitamin D3, yang pada akhirnya mengarah kepada osteomalasia atau osteoporosis, terutama bila terjadi keracunan kadmium yang berat. Salah satu bentuk keracunan kadmium yang paling kronis dan parah adalah penyakit Itai-itai, yang ditandai dengan osteomalasia osteopenik, anemia ginjal, dan nefropati tubular. Dalam konteks fungsi ginjal, kadmium mampu mengurangi laju filtrasi glomerulus (GFR) secara signifikan, mengganggu kapasitas filtrasi yang tersisa, dan menyebabkan nefrotoksisitas. Paparan kadmium yang berkepanjangan dapat memperburuk fungsi organ, termasuk hati, lambung, kandung kemih, dan paru-paru. Proses inhalasi kadmium untuk waktu yang lama dapat mengakibatkan kerusakan pada jaringan paru-paru. Kadmium juga menghambat aktivitas enzim eNOS, mengganggu relaksasi pembuluh darah yang dipicu oleh asetilkolin, dan berpotensi menyebabkan hipertensi, penyakit arteri perifer, serta meningkatkan risiko kematian terkait kardiovaskular. Selain itu, paparan kadmium berdampak negatif pada sistem reproduksi, pada pria maupun wanita (Ohiagu *et al.*, 2022)

1.5.3 Mekanisme Toksisitas Kadmium

A. Termokinetika

Berdasarkan toksikokinetiknya, kadmium (Cd) menimbulkan toksisitas melalui proses penyerapan, distribusi, metabolisme, dan ekskresi. Kadmium masuk ke tubuh manusia terutama melalui inhalasi

dan konsumsi, dengan inhalasi menunjukkan efisiensi penyerapan yang lebih tinggi, khususnya dari asap rokok dan emisi industri. Setelah diserap, Cd berikatan dengan protein plasma dan metalotionein dan didistribusikan terutama ke hati dan ginjal, kemudian terakumulasi secara preferensial di sel tubulus proksimal ginjal. Kadmium tidak dimetabolisme secara signifikan, sebaliknya, membentuk kompleks Cd–metalotionein yang stabil yang memperpanjang retensinya di dalam tubuh. Kompleks ini disaring oleh glomerulus dan diserap kembali di tubulus ginjal, yang menyebabkan pelepasan Cd intraseluler, stres oksidatif, disfungsi mitokondria, dan kerusakan ginjal progresif. Ekskresi kadmium terjadi secara perlahan melalui urin, dan waktu paruh biologisnya yang panjang (sekitar 10–30 tahun) mengakibatkan bioakumulasi dan toksisitas kronis bahkan pada tingkat paparan rendah, menjadikan kadmium sebagai zat beracun nefrotoksik dan sistemik yang kuat (Qu & Zheng, 2024).

B. Termodinamika

Berdasarkan termodinamika, toksisitas kadmium (Cd) terjadi karena kemampuannya yang kuat untuk berikatan dengan ligan biologis dan interaksi energinya yang menguntungkan dengan komponen seluler penting. Kadmium biasanya berbentuk Cd^{2+} dan stabil secara termal ketika berikatan dengan gugus yang mengandung sulfur, terutama gugus tiol ($-\text{SH}$) dalam protein seperti metalotionein, enzim, dan pengangkut membran. Ikatan antara kadmium dan gugus tiol yang kuat ini memiliki energi tinggi, menyebabkan penghambatan enzim yang tidak dapat

dibalikkan, kesalahan dalam pelipatan protein, serta gangguan pada keseimbangan oksidasi-reduksi dalam sel. Selain itu, Cd^{2+} dapat meniru kation esensial divalen seperti Ca^{2+} dan Zn^{2+} secara termodinamika, sehingga mampu menggantikan ion-ion ini di tempat pengikatan pada protein dan saluran ion, sehingga mengganggu sinyal kalsium dan proses enzimatik yang bergantung pada logam. Meskipun kadmium tidak bersifat reduktif, interaksinya yang stabil dengan protein mitokondria dan enzim antioksidan secara termodinamis mempercepat kebocoran elektron dan penumpukan spesies oksigen reaktif (ROS), yang secara tidak langsung meningkatkan stres oksidatif. Interaksi yang menguntungkan secara energi tetapi berbahaya secara biologis ini menjelaskan bagaimana kadmium terus-menerus mengganggu keseimbangan seluler dan memicu toksisitas jangka panjang pada tingkat molekuler (Qu & Zheng, 2024).

1.5.4 Pengobatan dan pencegahan

Pengobatan dan mencegah paparan kadmium (Cd) bertujuan untuk mengurangi paparan lebih lanjut, proses detoksifikasi, serta memberikan terapi pendukung agar organ tidak rusak. Langkah pertama adalah memindahkan individu dari sumber paparan dan memberikan terapi pendukung seperti pencucian lambung atau pengobatan untuk gejala yang muncul. Untuk paparan jangka panjang, salah satu metode yang digunakan adalah terapi khelasi, yang bekerja dengan mengikat ion logam dan membantu mengeluarkannya dari tubuh, meski efektivitasnya terbatas dan harus dijalankan sesuai protokol medis yang benar. Sebagai bagian dari

upaya pencegahan, dilakukan pemantauan kadar kadmium dalam darah dan urin, pengawasan lingkungan kerja, serta penerapan kebijakan dan pengurangan paparan lingkungan, sehingga secara keseluruhan dapat mengurangi risiko keracunan kadmium pada kelompok yang terpapar (Rahimzadeh et al., 2017).

1.6 Sampel Uji

1.6.1 Darah

Darah digunakan sebagai sampel untuk mengukur kadar kadmium di dalam tubuh dan sering digunakan untuk menilai paparan jangka pendek atau penumpukan kadmium dalam tubuh yang sedang berlangsung. Karena ion kadmium yang baru terhirup atau terserap melalui makanan akan terdeteksi dalam darah sebelum menumpuk ke jaringan seperti ginjal (Vacchi-Suzzi *et al.*, 2017).

1.6.2 Rambut dan kuku

Sampel rambut dan kuku bisa digunakan untuk mengetahui paparan logam berat seperti kadmium karena keduanya menumpuk logam secara perlahan sepanjang proses pertumbuhan jaringan. Rambut tumbuh bertahap dan merekam elemen-elemen yang tertanam saat proses pertumbuhan, sehingga konsentrasi logam di rambut atau kuku bisa memberikan gambaran mengenai paparan jangka panjang. Namun, dalam penerapan biomonitoring kadmium, penggunaan rambut dan kuku masih jarang dibandingkan dengan darah atau urin karena kadar kadmium di rambut dan kuku sering kali tidak memiliki hubungan yang kuat dengan kadar kadmium yang benar-benar ada di dalam tubuh, terutama untuk kadmium yang terikat

di dalam jaringan internal. Hasilnya juga mudah terkontaminasi oleh faktor-faktor eksternal seperti debu, sampo, kosmetik, dan lingkungan, sehingga interpretasinya kurang akurat (Martinez Morata *et al.*, 2023)

1.6.3 Urin

Sampel urin lebih unggul untuk pemeriksaan kadmium karena kadar kadmium di dalamnya mencerminkan akumulasi paparan jangka panjang pada manusia, terutama di ginjal, yang merupakan tempat utama penimbunan kadmium setelah terpapar secara terus-menerus. Setelah masuk ke dalam tubuh, kadmium mengikat protein pembawa seperti metallothionein, lalu menumpuk di jaringan ginjal selama bertahun-tahun, kemudian secara perlahan dikeluarkan melalui urin. Karena itu, kadar kadmium dalam urin menunjukkan beban kumulatif dalam tubuh yang lebih stabil dari waktu ke waktu, dibandingkan kadar kadmium dalam darah yang lebih mencerminkan paparan terbaru (Vacchi-Suzzi *et al.*, 2017).

1.6.4 Kadmium dalam urin sebagai biomarker

Kadmium dalam urin (*urinary cadmium*, U-Cd) digunakan sebagai biomarker karena mencerminkan akumulasi kadmium jangka panjang dalam tubuh, terutama di ginjal. Setelah terpapar melalui makanan, asap rokok, atau lingkungan kerja, kadmium terakumulasi di tubulus proksimal ginjal dan dilepaskan secara perlahan ke dalam urin (Vacchi-Suzzi *et al.*, 2017).

1.7 Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)

Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) adalah metode analisa kimia kuantitatif untuk menentukan konsentrasi unsur logam dalam sampel, dengan mengukur jumlah radiasi cahaya yang diserap oleh atom logam bebas pada panjang gelombang tertentu. SSA sangat sensitif dan spesifik untuk analisis logam pada kadar rendah (Sugito & Dewi, 2021).

1.7.1 Prinsip kerja Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)

Prinsip kerja alat Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) berlandaskan pada penyerapan elektromagnetik oleh atom logam bebas yang terbentuk setelah proses diatomisasi sampel (misalnya menggunakan nyala api atau tungku grafit), di mana cahaya dari sumber radiasi (seperti lampu katoda berongga) melintas melalui uap atom logam tersebut, kemudian akan menangkap cahaya pada panjang gelombang tertentu ketika elektron berpindah dari tingkat energi dasar menjadi keadaan tereksitasi, dan jumlah cahaya yang diserap sejalan dengan konsentrasi atom logam dalam sampel berdasarkan hukum Beer-Lambert, sehingga memungkinkan untuk menentukan secara kuantitatif jumlah logam berat yang terkandung (Maharani *et al.*, 2024).

1.7.2 Keunggulan Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) dalam analisis logam berat

Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) memiliki keunggulan utama dalam menganalisis logam berat karena sensitivitas dan selektivitasnya yang tinggi. Setiap logam memiliki panjang gelombang serapan khusus, sehingga

SSA bisa menganalisis logam tertentu secara spesifik tanpa terganggu oleh logam lain. Metode ini juga bisa mendeteksi logam berat dalam jumlah sangat rendah (jejak). Selain itu, SSA tidak memerlukan proses pemisahan yang rumit sebelum analisis, sehingga lebih efisien dan akurat dalam menentukan kandungan logam berat pada berbagai jenis sampel.

Salah satu kelebihan lainnya adalah SSA relatif mudah dan cepat, serta memiliki tingkat ketelitian dan presisi yang baik. Metode ini bisa digunakan pada berbagai jenis sampel seperti air, makanan, lingkungan, dan sampel biologis untuk mendeteksi adanya logam berat. Instrumen SSA juga bisa diatur dengan fleksibel melalui berbagai cara atomisasi seperti nyala, uap, atau furnace, yang bisa disesuaikan dengan jenis dan konsentrasi logam yang dianalisis. Maka dari itu, SSA menjadi metode yang umum digunakan dan sangat andal dalam analisis logam berat (Maharani *et al.*, 2024).

