BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pencemaran Udara

Pencemaran udara merupakan salah satu bentuk pencemaran lingkungan yang banyak terjadi di kawasan perkotaan akibat aktivitas transportasi dan industri. Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, pencemaran udara adalah:*Masuk atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu udara yang telah ditetapkan."* Definisi tersebut menegaskan bahwa suatu kondisi udara dinyatakan tercemar apabila konsentrasi parameter pencemar telah melebihi baku mutu udara ambien yang berlaku. Dengan demikian, evaluasi kualitas udara harus mengacu pada standar baku mutu yang telah ditetapkan pemerintah. Menurut World Health Organization (WHO), pencemaran udara merupakan salah satu faktor risiko lingkungan terbesar terhadap kesehatan global.

Sumber pencemaran udara dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Sumber bergerak (kendaraan bermotor)
2. Sumber tidak bergerak (industri, pembangkit listrik)
3. Sumber alami (debu tanah, kebakaran hutan)

Di wilayah perkotaan seperti Surabaya, sektor transportasi merupakan kontributor utama pencemar partikulat halus. Pertumbuhan transportasi, kegiatan industri, dan pembangunan menghasilkan sejumlah besar emisi PM2.5, NO_2, dan O_3, terutama di kawasan dengan aktivitas industri dan lalu lintas padat (Tarisya et al., 2025).

2.2 *Particulate Matter* (PM)

Particulate Matter (PM) atau materi partikulat adalah campuran partikel padat dan/atau tetesan cairan berukuran sangat kecil yang melayang di udara. Partikel ini dapat berasal dari proses alami maupun aktivitas manusia dan dapat terhirup ke dalam sistem pernapasan dan berpotensi menimbulkan dampak kesehatan yang lebih serius.

Secara ilmiah, *particulate matter* didefinisikan sebagai partikel dengan ukuran mikroskopis yang tersuspensi di udara dan diklasifikasikan berdasarkan diameter aerodinamisnya seperti PM10 dan PM2.5.

A. Sumber Primer (langsung dilepaskan ke udara)

- Emisi kendaraan bermotor
- Pembakaran bahan bakar fosil
- Aktivitas industri
- Debu konstruksi dan jalan
- Kebakaran hutan

B. Sumber Sekunder (terbentuk di atmosfer)

Terbentuk dari reaksi kimia gas seperti:

- Sulfur dioksida (SO_2)
- Nitrogen oksida (NO_x)
- Amonia (NH_3)
- Senyawa organik volatil (VOC)

2.3 *Particulate Matter* (PM2.5)

2.3.1 Definisi PM2.5

Particulate Matter berukuran ≤2,5 μm (PM2.5) merupakan partikel halus yang dapat bertahan lama di atmosfer dan memiliki kemampuan penetrasi hingga alveoli paru-paru. Menurut World Health Organization (2021), batas pedoman kualitas udara untuk PM2.5 adalah 5 μg/m³ (rata-rata tahunan) dan 15 μg/m³ (rata-rata 24 jam). Karena ukurannya sangat kecil, partikel ini memiliki waktu tinggal lebih lama di atmosfer dan lebih berbahaya bagi kesehatan. Sumber utama PM2.5 menurut (Yin, 2025) terbagi menjadi 3 yaitu sumber alami, sumber antropogenik dan pembentukan sekunder. Lalu lintas kendaraan dan pembakaran bahan bakar domestik adalah sumber dominan PM2.5 di lingkungan perkotaan, yang juga berdampak pada kualitas udara dalam dan luar ruangan.

Studi Kasus di Indonesia, Khususnya Bantul Yogyakarta menurut (Umar et al., 2025) menunjukkan bahwa paparan $PM_{2.5}$ melebihi standar dan berkaitan dengan keluhan kesehatan pernapasan. Sedangkan penelitian (Delavar et al., 2023) Meninjau hubungan paparan $PM_{2.5}$ dengan rawat inap akibat penyakit paru obstruktif kronik (COPD).

Di Indonesia, baku mutu udara ambien nasional untuk PM2.5 berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021 adalah: 15 μg/m³ (rata-rata tahunan) dan 55 μg/m³ (rata-rata 24 jam).

PM2.5 di lingkungan perkotaan umumnya berasal dari:

a. Emisi kendaraan bermotor
b. Industri dan pembakaran bahan bakar fosil
c. Kegiatan konstruksi
d. Resuspensi debu jalan

2.3.2 Karakteristik Fisik dan Kimia

PM2.5(*Particulate Matter* ≤ 2.5 μm) adalah partikel udara berukuran sangat kecil dengan diameter aerodinamis ≤ 2,5 mikrometer. Karena ukurannya sangat halus, partikel ini dapat bertahan lama di udara dan mudah masuk ke sistem pernapasan. Berikut karakteristik fisik dan kimia PM2.5, yaitu:

A. Karakter Fisik PM2.5

Ukuran yang sangat kecil membuat PM2.5 mudah melayang lama diatmosfer, dapat menembus alveoli paru-paru. Sedangkan bentuk partikelnya tidak beraturan *(irregular)* tergantung pada sumbernya. Contohnya seperti *spherical* (bulat) biasanya terdapat pada hasil proses pembakaran, *aggregate/cluster* merupakan gabungan beberapa partikel kecil dan fibrous atau kristalin merupakan sumber yang berasal dari mineral atau debu tanah. Untuk luas permukaan tinggi, karena ukurannya sangat kecil, PM2.5 memiliki *surface area* besar dibanding massanya yang mengakibatkan mudah mengikat senyawa kimia berbahaya dan berfungsi sebagai *carrier* polutan toksik. Densitas partikel PM2.5 bervariasi tergantung komposisi. Waktu tinggal PM2.5 diatmosfer bertahan selama beberapa hari hingga minggu tergantung pada kecepatan angin, turbulensi atmosfer, dan proses deposisi.

B. Karakter Kimia PM2.5

Komposisi kimia PM2.5 sangat komplek dan tergantung pada sumber emisi. Menurut (He et al., 2025) Sulfat berkontribusi sebesar 12-25%,Nitrat 10-20 %, Ammonium 8- 15%, Karbon Organik sebesar 20-40 %, Karbon Elementer 5-10% dan mineral dust dan lainnya sebesar 5-15%. Komponen sulfate, nitrate, dan ammonium dikenal sebagai *Secondary Inorganic Aerosols (SIA)* dan sering menyumbang lebih dari 50% massa PM2.5 di atmosfer perkotaan.

a. Karbon Elementer (*Elemetal Carbon* /EC)

Karbon elementer berasal dari pembakaran tidak sempurna bahan bakar fosil seperti kendaraan bermotor. Ciri- ciri EC bersifat absorber radiasi

matahari, sering disebut black carbon dan dominan pada emisi kendaraan diesel.

b. Karbon Organik (*Organic Carbon* /OC)

Karbon organic terdiri dari berbagai senyawa organik kompleks seperti hidrokarbon aromatic polisiklik (PAHs), Aldehid, dan Keton. Dimana sumber utama OC berasal dari kendaraan bermotor, pembakaran biomassa dan industri.

c. Ion Anorganik

Ion anorganik merupakan komponen utama PM2.5 sekunder di atmosfer. Contohnya Sulfat, Nitrat, dan Amonium. Ketiga komponen ini sering membentuk ammonium sulfate dan ammonium nitrat.

d. Logam Berat

PM2.5 sering mengandung *trace metals* yang bersifat toksik, seperti timbal, cadmium, kromium, nikel, seng, dan besi yang sumber utamanya berasal dari emisi kendaraan, abrasi rem dan ban serta aktivitas industri.

e. Senyawa Sekunder Atmosfer

Sebagian PM2.5 terbentuk melalui reaksi kimia di atmosfer, partikel ini disebut *secondary particulate matter.*

2.3.3 Sumber PM2.5

Particulate Matter (PM2.5) di atmosfer berasal dari berbagai sumber yang secara umum dapat diklasifikasikan menjadi sumber alami dan sumber antropogenik. Sumber alami meliputi debu tanah, erosi angin, kebakaran hutan, dan aktivitas vulkanik (Aydar & Akkaş, 2021). Namun, di wilayah perkotaan industri, sumber antropogenik mendominasi kontribusi terhadap konsentrasi PM2.5 (Septian Maksum & Flora Ninta Tarigan, 2022)

Berdasarkan penelitian yang dilakukan di Indonesia oleh Lestiani et al. (2023), sumber potensial PM2.5 di wilayah perkotaan meliputi emisi kendaraan

bermotor, debu jalan, pembakaran biomassa, industri logam, dan emisi pelabuhan . Penelitian tersebut mengidentifikasi bahwa karbon hitam (*black carbon*) menyumbang sekitar 19% dari massa PM2.5 (Lestiani et al., 2023). Selain itu, penelitian oleh Kuang et al., 2022 menunjukkan bahwa ion anorganik sekunder (sulfat, nitrat, dan amonium) merupakan komponen utama PM2.5 dengan kontribusi mencapai 54% dari total massa. Sumber utama PM2.5 di wilayah tersebut meliputi pembentukan nitrat sekunder (35%), emisi kendaraan bermotor (26%), dan pembentukan sulfat sekunder (19%). Kontribusi emisi kendaraan bermotor terhadap PM2.5 meningkat secara signifikan ketika kondisi atmosfer stagnan (tidak ada angin). Penelitian tersebut juga menekankan bahwa pembentukan nitrat sekunder merupakan faktor pendorong utama peningkatan konsentrasi PM2.5, terutama pada kondisi transportasi polutan dari wilayah industri di sekitarnya.

2.3.4 Mekanisme Pembentukan PM2.5 dari Kendaraan Bermotor

Emisi PM2.5 dari kendaraan bermotor berasal dari dua mekanisme utama yaitu emisi langsung atau primer dan pembentukan sekunder di atmosfer. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa proses sekunder berkontribusi signifikan terhadap total massa PM2.5 di lingkungan perkotaan (Liao et al., 2024a)

Emisi primer dihasilkan langsung dari proses pembakaran bahan bakar di dalam mesin kendaraan. Komponen utama emisi primer PM2.5 meliputi karbon elementer yang berupa partikel hitam atau jelaga bersifat menyerap radiasi matahari dan dominan pada kendaraan diesel, karbon organik yang merupakan senyawa organik kompleks seperti PAH, aldehida, dan keton dari pembakaran bahan bakar dan pelumas, serta logam berat seperti timbal, kadmium, kromium, nikel, seng, dan besi yang berasal dari abrasi mesin dan kontaminasi bahan bakar. Penelitian oleh Liao et al., 2024 menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi nitrat, amonium, dan karbon hitam berkontribusi terhadap peningkatan kadar PM2.5 akibat pengaruh emisi kendaraan bermotor . Berdasarkan hasil analisis sumber, kontribusi emisi terkait lalu lintas terhadap PM2.5 meningkat sebesar 13 persen ketika aktivitas kendaraan tinggi.

Selain dari knalpot atau yang disebut emisi *exhaust*, kendaraan juga melepaskan partikel dari emisi non-*exhaust* yang meliputi abrasi rem yang menghasilkan partikel logam seperti besi, tembaga, dan seng dari gesekan kampas rem dengan cakram, abrasi ban yang menghasilkan partikel karet dan senyawa organik, serta resuspensi debu jalan yaitu partikel yang sudah mengendap di jalan terangkat kembali oleh gerakan kendaraan (Lakshmanan et al., 2026). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa emisi PM2.5 dari resuspensi debu jalan lebih tinggi dibandingkan dari abrasi ban dan rem, dan emisi non-*exhaust* seringkali melebihi emisi dari knalpot itu sendiri. Hal ini sejalan dengan Liao et al., 2024 yang juga menekankan bahwa emisi non-knalpot seperti dari rem, ban, dan pelapisan jalan merupakan sumber signifikan logam di atmosfer perkotaan.

Pembentukan sekunder di atmosfer merupakan proses yang paling signifikan dan seringkali berkontribusi lebih besar dari pada emisi primer. Ketika gas buang kendaraan seperti NO_x, SO_2, dan VOC dilepaskan ke atmosfer, terjadi reaksi kimia yang menghasilkan partikel halus baru. Penelitian oleh Almira et al., 2024 mengungkapkan temuan penting bahwa konsentrasi PM2.5 secara bertahap meningkat seiring bertambahnya jarak dari ujung knalpot dalam gumpalan asap, dengan peningkatan faktor relatif 8 µg/m3 sampai 22 µg/m3. Emisi karbon elementer relatif tidak berubah, namun karbon organik dan karbon total meningkat seiring bertambahnya jarak. Konsentrasi sulfat, nitrat, dan amonium yang langsung diemisikan oleh kendaraan sangat rendah tetapi meningkat dengan cepat dalam gumpalan asap, yang mengindikasikan bahwa sebagian besar PM2.5 dari kendaraan bermotor sebenarnya terbentuk setelah gas buang meninggalkan knalpot (Shen et al., 2021a). Proses pembentukan sekunder ini dimulai dengan oksidasi gas prekursor di mana NO_x dari pembakaran dioksidasi menjadi asam nitrat, SO_2 dari bahan bakar diesel atau bensin dioksidasi menjadi asam sulfat, dan VOC dioksidasi menjadi senyawa oksigenat yang kurang mudah menguap membentuk aerosol organik sekunder. Selanjutnya terjadi nukleasi dan kondensasi di mana asam sulfat dan asam nitrat bereaksi dengan amonia membentuk amonium sulfat dan amonium nitrat yang berukuran sangat kecil atau sub-mikro. Hal ini sejalan dengan Liao et al., 2024 menegaskan bahwa pembentukan nitrat sekunder telah menjadi

kontributor utama polusi kabut asap di lingkungan perkotaan karena peningkatan emisi kendaraan yang cepat .

Penelitian oleh (Liang et al., 2025) menunjukkan bahwa emisi kendaraan merupakan kontributor tunggal terbesar terhadap PM2.5 dan VOC, yaitu menyumbang 41 persen dari total sumber . Emisi kendaraan dan volatilisasi bahan bakar merupakan sumber utama VOC yang berkontribusi terhadap pembentukan aerosol organik sekunder di wilayah perkotaan. Aerosol organik sekunder ini dapat menyumbang hingga 31 persen dari total massa PM2.5. Penelitian oleh Wu et al., 2025 juga mengidentifikasi bahwa aerosol organik sekunder dari emisi kendaraan merupakan komponen penting dalam pembentukan PM2.5 di atmosfer perkotaan . Penelitian pada emisi kendaraan diesel oleh Shen et al., 2021 mengungkapkan bahwa pembentukan partikel amonium nitrat sangat penting dalam gumpalan asap, dan pembentukan karbon organik sekunder memainkan peran utama dalam pembentukan PM2.5 sekunder. Temuan ini membuktikan bahwa sebagian besar PM2.5 dari kendaraan bermotor sebenarnya terbentuk setelah gas buang meninggalkan knalpot, bukan langsung dihasilkan dalam jumlah besar dari mesin. Proses pembentukan sekunder ini menjelaskan mengapa konsentrasi PM2.5 seringkali lebih tinggi pada jarak tertentu dari jalan, bukan tepat di sumbernya

2.3.5 Dampak PM2.5 terhadap Kesehatan

Karakteristik fisik dan kimia PM2.5 menyebabkan partikel ini sangat berbahaya bagi kesehatan manusia. Ukurannya yang sangat kecil, yaitu kurang dari atau sama dengan 2,5 mikrometer, memungkinkan partikel ini masuk hingga ke alveoli paru-paru dan bahkan menembus aliran darah. Luas permukaan partikel yang besar relatif terhadap massanya menyebabkan PM2.5 mudah mengikat senyawa kimia berbahaya seperti logam berat dan *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAH) yang bersifat karsinogenik. Karena partikel-partikel ini dapat terhirup dan terdeposisi di dalam sistem pernapasan hingga ke unit pertukaran gas alveolar, PM2.5 dapat menembus sawar darah-otak dan selanjutnya terdistribusi ke seluruh tubuh melalui aliran darah, sehingga menimbulkan efek merugikan pada

berbagai organ dan sistem tubuh manusia (Almira et al., 2024; Amnuaylojaroen & Parasin, 2024; Sangkham et al., 2024)

Paparan jangka panjang terhadap PM2.5 dapat menyebabkan berbagai penyakit serius. Studi epidemiologi telah menunjukkan bahwa paparan PM2.5 dikaitkan dengan peningkatan risiko penyakit kardiovaskular, termasuk penyakit jantung iskemik, hipertensi, serangan jantung, dan stroke (Yan et al., 2025). Selain itu, paparan PM2.5 juga terkait erat dengan penyakit pernapasan seperti penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), asma, infeksi saluran pernapasan akut bagian bawah, serta penurunan fungsi paru (Regulation et al., 2024). Bukti ilmiah tersebut juga menunjukkan bahwa paparan PM2.5 merupakan faktor risiko signifikan untuk kanker paru, dengan meta-analisis menunjukkan hubungan positif yang kuat antara paparan PM2.5 jangka panjang dengan mortalitas akibat kanker paru .

Pada penelitian yang dilakukan oleh Amnuaylojaroen & Parasin, 2024 menunjukan bahwa kelompok anak-anak memiliki kerentanan yang lebih tinggi terhadap paparan PM2.5 karena sistem pernapasan dan imun mereka masih berkembang. Paparan PM2.5 pada anak dikaitkan dengan gejala pernapasan, penurunan fungsi paru, peningkatan kejadian asma, serta gangguan perkembangan neurokognitif. Sementara itu, pada lansia yang memiliki kondisi kesehatan bawaan, paparan PM2.5 dapat memperburuk penyakit yang sudah ada, meningkatkan risiko rawat inap akibat penyakit pernapasan dan kardiovaskular, serta mempercepat penurunan fungsi kognitif . Kelompok wanita hamil juga rentan karena paparan PM2.5 selama kehamilan dapat mempengaruhi perkembangan sistem kardiovaskular dan saraf pusat janin.

2.3.6 Bahan Baku Mutu PM2.5

Baku mutu udara ambien adalah batas konsentrasi polutan yang diperbolehkan berada di udara agar tidak menimbulkan gangguan terhadap kesehatan manusia, makhluk hidup, dan lingkungan. Untuk PM2.5, terdapat dua standar utama yang menjadi acuan dalam penelitian ini, yaitu standar nasional Indonesia dan standar internasional dari *World Health Organization* (WHO).

Standar Nasional Indonesia berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup menetapkan baku mutu PM2.5 sebesar 55 mikrogram per meter kubik untuk pengukuran 24 jam dan 15 mikrogram per meter kubik untuk pengukuran tahunan. Kedua nilai ini berlaku untuk sistem pengukuran aktif maupun manual. Bahan baku berdasarkan PP no 22 tahun 2021 dapat dilihat pada tabel 2.1.

Standar World Health Organization (WHO) yang diperbarui pada tahun 2021 menetapkan ambang batas yang jauh lebih ketat berdasarkan bukti ilmiah terbaru mengenai dampak PM2.5 terhadap kesehatan(WHO, 2021). WHO merekomendasikan rata-rata tahunan PM2.5 tidak melebihi 5 mikrogram per meter kubik dan rata-rata 24 jam tidak melebihi 15 mikrogram per meter kubik . WHO juga menyediakan target antara (*interim targets*) untuk negara-negara dengan polusi tinggi, yaitu 35 $\mu g/m^3$, 25 $\mu g/m^3$, 15 $\mu g/m^3$, dan 10 $\mu g/m^3$ untuk rata-rata tahunan, sebagai tahapan bertahap menuju pedoman akhir.

Tabel 2. 1 Baku Mutu Udara Ambien

No	Parameter	Waktu Pengukuran	Baku Mutu ($\mu g/m^3$)	Sistem Pengukuran
1	Sulfur Dioksida (SO_2)	1 jam	150	aktif kontinu/manual
		24 jam	75	aktif kontinu
		1 tahun	45	aktif kontinu
2	Karbon Monoksida (CO)	1 jam	10.000	aktif kontinu
		8 jam	4.000	aktif kontinu
3	Nitrogen Dioksida (NO_2)	1 jam	200	aktif kontinu/manual
		24 jam	65	aktif kontinu
		1 tahun	50	aktif kontinu
4	Oksidan Fotokimia (Ox) (sebagai Ozon O_3)	1 jam	150	aktif kontinu
		8 jam	100	aktif kontinu
		1 tahun	35	aktif kontinu
5	Hidrokarbon Non-Metana (NMHC)	3 jam	160	aktif kontinu
6	Partikulat Debu <100 µm (TSP)	24 jam	230	aktif manual
7	Partikulat Debu <10 µm (PM_{10})	24 jam	75	aktif kontinu/manual
		1 tahun	40	aktif kontinu

8	Partikulat Debu ≤2,5 µm ($PM_{2.5}$)	24 jam	55	aktif kontinu/manual
		1 tahun	15	aktif kontinu
9	Timbal (Pb)	24 jam	2	aktif manual

Sumber : Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021

2.4 Emisi Kendaraan Bermotor

Emisi kendaraan bermotor berasal dari proses pembakaran bahan bakar pada mesin kendaraan. Besarnya emisi dipengaruhi oleh:

- jenis kendaraan
- jenis bahan bakar
- teknologi mesin
- kecepatan kendaraan
- volume lalu lintas

2.4.1 Sumber Emisi Transportasi

Emisi PM2.5 dari kendaraan bermotor berasal dari:

1. *Exhaust emission* (hasil pembakaran bahan bakar)
2. *Non-exhaust emission*, seperti:
    a. Keausan rem
    b. Keausan ban
    c. Resuspensi debu jalan

Di koridor arteri seperti Jalan Ahmad Yani, volume lalu lintas tinggi menyebabkan peningkatan signifikan konsentrasi $PM_{2.5}$ di udara ambien. Pendekatan kuantitatif yang umum digunakan adalah metode inventarisasi emisi berbasis faktor emisi:

$E=V\times EF$ …….. (2.1)

Dimana:

E =Beban Emisi (g/hari)
V =Volume kendaraan (kendaraan/hari)
EF =Faktor emisi (g/km)

Metode ini digunakan secara luas dalam perhitungan kontribusi sektor transportasi terhadap konsentrasi partikulat di wilayah perkotaan. Inventarisasi ini penting untuk menghubungkan beban emisi dengan konsentrasi $PM_{2.5}$ terukur.

2.5 Hubungan Volume Lalu Lintas dan Konsentrasi PM2.5

Berbagai studi internasional menunjukkan bahwa konsentrasi PM2.5 di koridor jalan meningkat signifikan pada jam sibuk (*peak hour*), ketika volume kendaraan dan kecepatan rata-rata menurun (kondisi *stop-and-go traffic*).

Konsentrasi PM2.5 pada *roadside environment* dapat 1,5–3 kali lebih tinggi dibandingkan latar belakang perkotaan (*urban background*). Faktor yang memengaruhi antara lain:

a. Volume dan komposisi kendaraan
b. Kondisi meteorologi (kecepatan angin, suhu, kelembaban)
c. Geometri jalan
d. Kepadatan bangunan (*street canyon effect*)

Secara teoritis, peningkatan beban emisi akan meningkatkan konsentrasi lokal, terutama pada jarak ≤100 meter dari tepi jalan.

2.6 Dispersi Polutan di Atmosfer

Setelah dilepaskan ke atmosfer, polutan akan mengalami:

1. Adveksi (perpindahan oleh angin)
2. Difusi turbulen
3. Reaksi kimia sekunder
4. Deposisi

2.7 Koridor Jalan Perkotaan sebagai Hotspot Emisi

Koridor jalan arteri primer memiliki karakteristik:

- Volume lalu lintas tinggi
- Proporsi kendaraan berat signifikan
- Kemacetan pada jam sibuk

Hal ini menjadikan koridor tersebut sebagai hotspot pencemaran udara perkotaan.

2.8 Karakteristik Jalan Ahmad Yani Surabaya

Jalan Ahmad Yani merupakan salah satu jalan arteri primer utama di Kota Surabaya yang berfungsi sebagai akses penghubung antara pusat Kota Surabaya dengan wilayah selatan, serta menjadi bagian dari koridor utama menuju luar kota. Jalan ini memiliki peran strategis dalam sistem transportasi perkotaan karena menghubungkan berbagai pusat kegiatan ekonomi, perkantoran, pendidikan, dan perdagangan. Tingginya aktivitas di sepanjang koridor ini menjadikan volume lalu lintas yang melintas sangat tinggi, terutama pada jam-jam sibuk pagi dan sore hari (Indratmo, 2006).

Secara geometrik, Jalan Ahmad Yani memiliki lebar jalan 24 meter dengan 6 lajur (3 lajur per arah) serta dilengkapi median sebagai pemisah arus lalu lintas dua arah. Berdasarkan Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI) 2023, jalan dengan karakteristik tersebut termasuk dalam klasifikasi jalan enam lajur dua arah terbagi (6/2 D) (PKJI 2023)

Kepadatan bangunan yang tinggi di kedua sisi jalan menciptakan efek *street canyon*, yaitu kondisi di mana bangunan-bangunan tinggi menghambat dispersi vertikal polutan dan menyebabkan akumulasi PM2.5 di permukaan jalan. Penelitian Girotti et al. (2026) menunjukkan bahwa bentuk urban yang kompak dan padat dapat menghasilkan konsentrasi polutan hingga 80% lebih tinggi di tingkat pejalan kaki dibandingkan area terbuka.

Selain itu, aktivitas sekitar seperti SPBU, area drive-thru, dan pusat perbelanjaan menjadi sumber emisi tambahan yang turut berkontribusi terhadap konsentrasi PM2.5 lokal. Aktivitas ini menyebabkan kendaraan berhenti dengan mesin menyala (*idling*) dan bergerak perlahan, yang meningkatkan emisi partikulat di sekitar titik tersebut .

Berdasarkan karakteristik tersebut, Jalan Ahmad Yani menjadi hotspot pencemaran udara perkotaan yang memerlukan perhatian khusus dalam pengendalian kualitas udara. Pemahaman terhadap karakteristik jalan ini menjadi penting dalam menganalisis pola spasial konsentrasi PM2.5 dan merumuskan strategi mitigasi yang spesifik lokasi.

2.9 Indeks Standar Pencemar Udara

Untuk menentukan kualitas udara dan prioritas mitigasi di setiap segmen koridor Jalan Ahmad Yani, digunakan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) yang mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020. ISPU adalah angka tanpa satuan yang menggambarkan kondisi mutu udara ambien berdasarkan dampaknya terhadap kesehatan manusia, nilai estetika, dan makhluk hidup lainnya.

Tabel 2. 2 Kategori dan Breakpoint ISPU

Kategori	**Rentang ISPU**	**Penjelasan**
Baik	0 – 50	Tidak memberikan efek negatif terhadap kesehatan
Sedang	51 – 100	Masih dapat diterima pada kesehatan manusia
Tidak Sehat	101 – 200	Bersifat merugikan pada manusia, hewan, dan tumbuhan
Sangat Tidak Sehat	201 – 300	Meningkatkan risiko kesehatan pada populasi tertentu

Kategori	Rentang ISPU	Penjelasan
Berbahaya	>300	Merugikan kesehatan serius dan memerlukan penanganan cepat

Sumber: Permen LHK No. 14 Tahun 2020

2.10 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian menunjukkan:

Tabel 2. 3 Penelitian Terdahulu

No	Judul Penelitian	Penulis dan Tahun	Lokasi/Metode	Kesimpulan	Link Jurnal
1	Evaluasi Kualitas Udara Berdasarkan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) Di Kebun Jeruk Park (*Tree House*)	(Falihah et al., 2025)	Jakarta Barat, Indonesia — ISPU	Kualitas udara di kawasan wisata terbuka Kebon Jeruk Park (*Tree House*) secara umum berada pada kategori Baik hingga Sedang dengan nilai ISPU berkisar 47–48, yang menunjukkan udara relatif aman untuk aktivitas luar ruangan. Namun, fluktuasi kualitas udara tetap dipengaruhi oleh aktivitas kendaraan bermotor dan kondisi meteorologi, dengan PM2.5 sebagai parameter dominan yang mempengaruhi peningkatan nilai ISPU di kawasan perkotaan	https://share.google/Wvxsmp9ouGPD96iRX
2	Klasifikasi Dan Pemetaan Spasial Kualitas Udara Berbasis ISPU Menggunakan *Support Vector Machine* Dengan Data Multisumber	(Salsabila & Utami, 2025)	DKI Jakarta — SVM + pemetaan spasial	Peta kualitas udara resolusi tinggi berbasis ISPU berhasil dibuat dengan integrasi data stasiun pemantau dan citra satelit	https://share.google/kWfpKEJv4u6kS6b1U
3	*Analysis of Air Quality in Jambi City Based on Air Pollution Standard Index (ISPU)*	(Universitas Jambi, 2025)	Jambi, Indonesia — ISPU	PM2.5 masih menunjukkan banyak hari dengan kategori Sedang dan Tidak Sehat	https://online-journal.unja.ac.id/PROCA/article/view/55592
4	Analisis Konsentrasi PM2.5 & PM10 pada Fly-Over Urip Sumoharjo	(Masese et al., 2023)	Makassar, Indonesia — Pengukuran langsung	Konsentrasi PM2.5 meningkat mendekati titik kepadatan kendaraan bermotor	https://journal.unibos.ac.id/jebe/article/view/5354

5	*Emission characteristics and health effects of PM2.5 from vehicles in major urban agglomerations*	(Song & Wang, 2024)	Tiongkok — Analisis dampak kendaraan	Kendaraan bermotor berkontribusi pada PM2.5 dan berdampak pada kesehatan serta ekonomi publik	https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38962775/
6	Analisis keterkaitan kendaraan bermotor dengan konsentrasi *Particulate Matter* (PM)	(Matter et al., 2025)	Kota Padang, Indonesia — Pengukuran langsung	Menemukan hubungan antara jumlah kendaraan dan konsentrasi PM2.5, meskipun pengaruh meteorologi juga dianalisis	https://www.researchgate.net/publication/391755476_Analisis_keterkaitan_kendaraan_bermotor_dengan_konsentrasi_Particulate_Matter_PM_di_MAN_2_Kota_Padang
7	*Contribution of Traffic Emissions to PM2.5 Concentrations at Bus Stops*	(Hopke et al., 2025)	Denver, AS — Pengukuran PM2.5	*Traffic emissions* secara signifikan meningkatkan PM2.5 relatif terhadap latar belakang lokasi	https://www.mdpi.com/2071-1050/17/17/7707
8	*The mediating effect of microclimate in the impacts of roadside vegetation barriers on air pollution in pedestrian spaces*	(Sheng et al., 2025)	Nanjing, China — *Vegetation barrier*	Vegetasi dengan SVF rendah efektif mengurangi PM2.5, PM10, dan NO2 di area pejalan kaki	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132325005335
9	*Uneven PM2.5 dispersion pattern across an open-road vegetation barrier*	(Yan et al., 2024)	China — *Vegetation barrier*	Vegetasi penghalang dapat mengurangi PM2.5 lebih dari 15%, efektivitas berkorelasi positif dengan cakupan semak	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969724006168
10	*Integrating nature-based solutions and governance for air pollution mitigation in Delhi: the Delhi Great Green Wall framework*	(Kumar et al., 2026)	Delhi, India — *Green barrier*	Pendekatan hijau yang tersebar dan merata dapat menjadi solusi adaptif untuk pengendalian polusi udara perkotaan	https://www.semanticscholar.org/paper/Integrating-nature-based-solutions-and-governance-Kumar-Jaganathan/aa77786ddaaae0d5b69f1f6cca41e91cec66ab99