

Assessment of Roadside Ambient Air Quality and Transportation Pollutant Dispersion Using CALINE-4 in South Cimahi

Rahasta Kandiawan¹, Mila Dirgawati², Didin Agustian Permadi³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia
Email: rahastakandiawan13@gmail.com

Received 7 April 2026 | Revised 15 April 2026 | Accepted 21 April 2026

ABSTRAK

Udara merupakan komponen vital bagi kehidupan, namun peningkatan jumlah kendaraan, pembangunan kawasan, dan pertumbuhan penduduk perkotaan menurunkan kualitas udara ambien. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kualitas udara ambien di tepi jalan serta memprediksi penyebaran polutan CO dan PM₁₀ di Kecamatan Cimahi Selatan menggunakan model CALINE 4. Metode penelitian meliputi pemantauan kualitas udara, survei kinerja lalu lintas, dan pemodelan dispersi polutan berdasarkan data meteorologi, volume kendaraan, dan faktor emisi. Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi tertinggi SO₂ 40,36 µg/Nm³ atau 26,9%, CO 6,675 µg/Nm³ atau 66,8%, NO₂ 22,33 µg/Nm³ atau 11,2%, PM₁₀ 68,20 µg/Nm³ atau 90,9%, dan PM_{2.5} 32,20 µg/Nm³ atau 58,5%, seluruhnya masih memenuhi PP No. 22 Tahun 2021. Kinerja lalu lintas berada pada LOS C, dan prediksi dispersi menunjukkan konsentrasi tertinggi pada area downwind searah angin dominan. Pengendalian emisi dan sosialisasi masyarakat disarankan.

Kata kunci: CALINE 4, kualitas udara ambien, pemodelan dispersi, polutan CO, PM₁₀

ABSTRACT

Air is a vital component for life; however, the increasing number of vehicles, urban development, and population growth in urban areas have contributed to the degradation of ambient air quality. This study aims to evaluate roadside ambient air quality and predict the dispersion of CO and PM₁₀ pollutants in Cimahi Selatan District using the CALINE-4 model. The research methods include air quality monitoring, traffic performance surveys, and pollutant dispersion modeling based on meteorological data, vehicle volume, and emission factors. The results show that the highest concentrations were SO₂ at 40.36 µg/Nm³ (26.9%), CO at 6.675 µg/Nm³ (66.8%), NO₂ at 22.33 µg/Nm³ (11.2%), PM₁₀ at 68.20 µg/Nm³ (90.9%), and PM_{2.5} at 32.20 µg/Nm³ (58.5%), all of which remain within the limits of Government Regulation No. 22 of 2021. Traffic performance was categorized as LOS C, and dispersion predictions indicate the highest concentrations occur in downwind areas aligned with the prevailing wind direction. Emission control measures and public awareness campaigns are recommended.

Keywords: CALINE 4, dispersion modeling, roadside ambient air quality, CO pollutant, PM₁₀

1. PENDAHULUAN

Udara ambien didefinisikan sebagai udara bebas di permukaan bumi pada lapisan *troposfer* yang memengaruhi kesehatan manusia, makhluk hidup, dan lingkungan lainnya [1],[2]. Pencemaran udara ambien terjadi akibat penurunan kualitasnya karena masuknya polutan seperti CO, NO₂, SO₂, PM_{2.5}, dan PM₁₀ dari sumber *antropogenik*, terutama kendaraan bermotor yang menyumbang hingga 60% emisi di perkotaan [3],[4]. Dampaknya signifikan terhadap kesehatan, termasuk peningkatan kasus ISPA, pneumonia, dan risiko morbiditas/kematian, terutama pada kelompok rentan [5],[6].

Penelitian terdahulu mengungkap bahwa konsentrasi CO, NO_x, dan SO₂ tepi jalan arteri di kawasan perkotaan Indonesia umumnya masih di bawah baku mutu nasional, meski puncak CO mencapai 5-8 mg/m³ pada jam lalu lintas padat yaitu >2.000 smp/jam, faktor meteorologi contohnya angin >2 m/s dan RTH sebesar >20% luas lahan efektif kurangi hingga 30% via pengenceran dan adsorpsi. Volume kendaraan berat/truk tingkatan emisi PM₁₀/TSP 2-3 kali lipat dibanding kendaraan ringan, sementara kemacetan yaitu kondisi dimana kecepatan <20 km/jam perburuk CO hingga 40% karena idling panjang [7],[8]. Konsentrasi rendah NO₂ berkisar 20-50 µg/m³ dan SO₂ berkisar <40 µg/m³ pun berisiko tinggi, memicu gangguan pernapasan dan ISPA pada anak/anak usia sekolah di radius 100-200 m dari jalan [9].

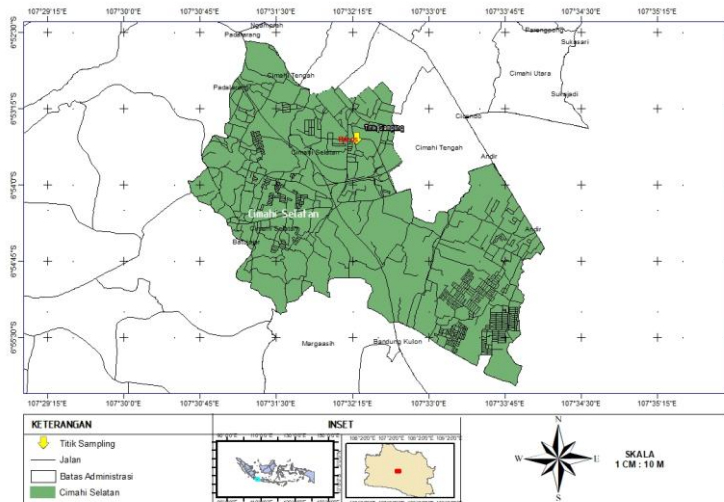
Pengendalian kualitas udara ambien di Indonesia masih terbatas efektivitasnya terlihat dari indeks kualitas udara di kota besar seperti di Jakarta yang sering masuk kategori kurang baik dengan AQI 150-170 akibat PM_{2.5} tinggi, serta kota-kota besar lain seperti Surabaya dan Medan yang mengalami kondisi serupa. Jaringan stasiun pemantauan masih kurang luas terutama di kota-kota sedang sementara emisi dari transportasi terus meningkat tanpa pengendalian memadai. Pengukuran langsung seperti *roadside monitoring* menjadi penting untuk menangkap konsentrasi polutan aktual tepat dari emisi kendaraan dekat area *sensitive* namun terhambat oleh keterbatasan titik pengukuran dan biaya operasional [10],[11]. Pemodelan dispersi seperti CALINE4 yang berbasis *Gaussian line-source* memprediksi akurat konsentrasi polutan dari garis sumber lalu lintas ke arah reseptor sensitif hingga radius 500 meter dengan input volume kendaraan, *emission factor* meteorologi dan geometri jalan. Model ini terbukti efektif untuk jalan arteri perkotaan dengan mempertimbangkan pengaruh arah angin suhu dan stabilitas atmosfer [12]. Kota Cimahi sebagai kota sedang yang padat dapat mewakili kota serupa di Indonesia untuk evaluasi kualitas udara ambien dari kendaraan bermotor yang terus meningkat. Jalan arteri primer dan sekunder sering overload VCR 0,8-0,9 memicu peningkatan emisi CO dan PM₁₀ saat kemacetan jam puncak sehingga dapat menjadi acuan untuk kota dengan karakteristik sama lainnya di Indonesia.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas udara ambien berdasarkan konsentrasi polutan SO₂, CO, NO₂, PM₁₀, dan PM_{2.5} tepi jalan Jl. HMS Mintaredja SH melalui *roadside monitoring* SNI 19-7119.9-2005 yang disinkronkan dengan traffic counting manual untuk menghitung VCR/DS kinerja lalu lintas, memprediksi dispersi polutan CO dan PM₁₀ menuju reseptor sensitif seperti sekolah dan rumah sakit dalam radius ≤500 m menggunakan model *Gaussian* CALINE4 dengan parameter meteorologi lokal, geometri jalan, serta stabilitas atmosfer, dan menghasilkan rekomendasi pengendalian pencemaran udara berbasis pemenuhan baku mutu PP No. 22/2021.

2. METODOLOGI

2.1 Lokasi

Kota Cimahi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, merupakan kota otonom di Bandung Metropolitan Area dengan kepadatan penduduk mencapai 13.924 jiwa/km² pada tahun 2023 dan pertumbuhan kendaraan sekitar 7% per tahun yang meningkatkan emisi transportasi. Kecamatan Cimahi Selatan sebagai wilayah terpadat menyumbang 41% populasi kota, sehingga memicu tingginya lalu lintas pada jalan arteri sekunder yang berdampak pada penurunan kualitas udara dan peningkatan risiko gangguan pernapasan masyarakat.



Gambar 1 Peta Administrasi Kecamatan Cimahi Selatan

2.2 Sampling Design

Penelitian ini dilaksanakan di Jalan HMS Mintaredja SH, yaitu salah satu jalan arteri sekunder di Kelurahan Cibeureum, Kecamatan Cimahi Selatan. Lokasi dipilih karena mewakili emisi garis dari transportasi padat dengan volume kendaraan hingga 7.206 unit/jam, berdekatan dengan kawasan industri serta permukiman, dengan jarak sampling 1-3 m dari tepi jalan sesuai SNI 19-7119.9-2005. Design terintegrasi mencakup pengukuran udara ambien meliputi sulfur dioksida (SO₂), karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), partikulat matter diameter 10 mikron (PM₁₀), partikulat matter diameter 2,5 mikron (PM_{2.5}), parameter meteorologi, serta kinerja lalu lintas yang mencakup volume kendaraan dan rasio derajat kejenuhan (DS/VCR), dan pemodelan CALINE4 untuk memprediksi dispersi polutan transportasi secara menyeluruh. Parameter tersebut diukur karena merupakan pencemar utama yang umum dihasilkan dari aktivitas transportasi dan berpengaruh terhadap kualitas udara serta kesehatan masyarakat. Selain itu, parameter yang digunakan telah mengacu pada baku mutu udara ambien nasional sesuai PP No. 22 Tahun 2021 sehingga hasil pengukuran dapat dibandingkan dengan standar kualitas lingkungan yang berlaku.

2.2.1 Parameter Pencemaran Udara

Parameter pengukuran berfokus pada polutan primer transportasi sesuai PP 22/2021 Lampiran VIII. Parameter pencemar yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Parameter Pencemaran Udara [13]

Parameter	Standar Pengukuran	Prinsip
SO ₂	150 µg/m ³ (1 jam); 75 µg/m ³ (24 jam)	Aktif kontinu/manual
CO	10.000 µg/m ³ (1 jam); 4.000 µg/m ³ (8 jam)	Aktif kontinu
NO ₂	200 µg/m ³ (1 jam); 65 µg/m ³ (24 jam)	Aktif kontinu/manual
PM ₁₀	75 µg/m ³ (24 jam)	Aktif kontinu
PM _{2.5}	55 µg/m ³ (24 jam)	Aktif kontinu/manual

2.2.1.1 Beban Emisi

Faktor emisi adalah nilai yang menunjukkan besarnya polutan yang dilepaskan ke atmosfer per satuan aktivitas sumber polusi. Nilai ini digunakan untuk mengestimasi total emisi yang dihasilkan oleh sumber polutan tertentu dalam proses inventarisasi dan pengelolaan pencemaran udara [14]. Berikut merupakan perhitungannya berdasarkan Permen LHK No. 12 tahun 2010 :

$$VKT_{ji, line} = Q_{ji} \cdot li \quad (1)$$

$$E_{eji} = VKT_{ji} \cdot EF_{ji} (100-C) / 100$$

2.2.2 Meteorologi

Parameter meteorologi diperlukan dalam pengukuran kualitas udara ambien dan pemodelan dispersi polutan karena mengontrol kecepatan dispersi *horizontal/vertikal* serta konsentrasi maksimum di reseptor. Data dikumpulkan bersamaan *roadside monitoring* pada Jl. HMS Mintaredja SH sesuai SNI SNI 03-6572-2001.

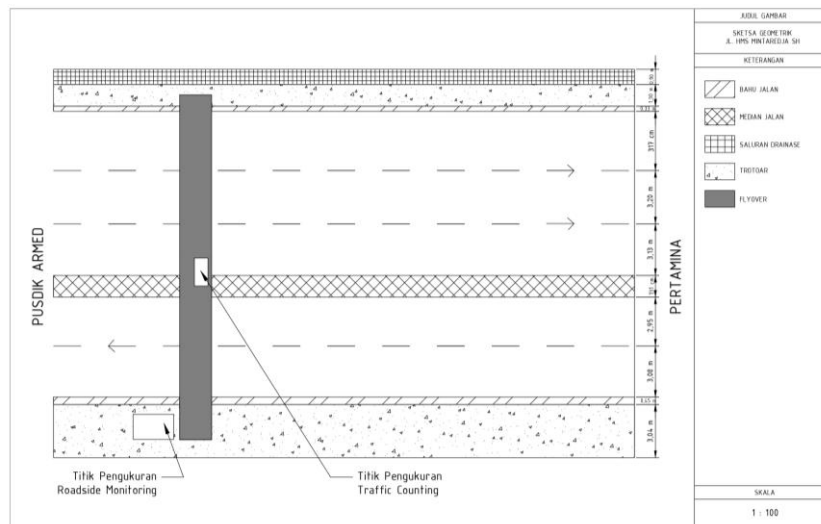
2.2.3 Kinerja Jalan

Pengukuran kinerja jalan dilakukan manual mengikuti pedoman Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) 1997 [15]. Pada 5 lajur selama jam puncak meliputi 06.00-09.00, 11.00-14.00, dan 16.00-19.00 dengan interval 5 menit per sesi untuk mengukur kecepatan. Kendaraan diklasifikasikan dan dikonversi ke satuan smp menggunakan faktor konversi satuan mobil penumpang yang menghasilkan data volume, kapasitas, derajat saturasi (DS/VCR), dan tingkat pelayanan (LOS). Parameter dan metode analisis kinerja jalan yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Kinerja Jalan [15]

Parameter	Data Input	Rumus	Satuan
Volume Lalu Lintas	Manual <i>counting</i> pada jam puncak	Σ (Kendaraan $\times$ Faktor SMP)	smp/ jam
Kapasitas Jalan (C)	Lebar lajur, jumlah lajur, tipe jalan	$C = 1900 \times n \times w \times f.c$	smp/ jam
Faktor Hambatan Samping	Intensitas kejadian	-	-
DS/VCR	Volume + Kapasitas	$VCR = V/C$	-
Kecepatan Rata-rata	Spot speed 30m/lajur	$V = \text{Jarak/Waktu}$	km/jam

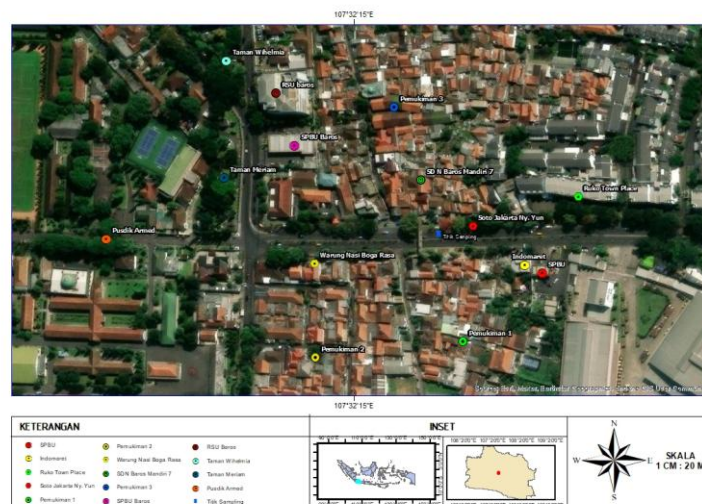
Analisis sketsa geometrik menunjukkan jalan ini berdimensi 15,5 meter dengan lima lajur dua arah yang dilengkapi fasilitas pendukung seperti bahu jalan dan trotoar seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Sketsa Geometrik Jalan HMS Mintaredja HS

2.2.4 CALINE 4

CALINE4 digunakan untuk memprediksi dispersi CO dan PM₁₀ dari emisi kendaraan hingga 500 m dari jalan raya serta mengidentifikasi reseptor berisiko di sekitar permukiman. Model ini bekerja dengan membagi ruas jalan menjadi beberapa link dan sub-elemen untuk menghitung kontribusi konsentrasi polutan pada setiap titik reseptor. Reseptor yang dipilih terdiri atas Reseptor Rawan (RR), yaitu RSU Baros dan SDN Baros Mandiri 7; Reseptor Semi Rawan (RSR), yaitu Taman Meriam, Taman Wihelmina, SPBU, Indomaret, SPBU Baros, dan Pusdik Armed; serta Reseptor Niaga (RN), yaitu Ruko Town Place, Warung Nasi Boga Rasa, dan Soto Jakarta Ny. Yun. Pemilihan reseptor didasarkan pada tingkat sensitivitas dan aktivitas di sekitarnya, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Titik titik Reseptor

Untuk memvalidasi data observasi lapangan dengan hasil pemodelan dilakukan perbandingan dengan metode *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Penggunaan MAPE sebagai metode validasi model kualitas udara juga telah diterapkan dalam penelitian dispersi polutan di kawasan perkotaan Indonesia [16]. Output yang dihasilkan berupa konsentrasi polutan ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) yang kemudian divisualisasi kan menjadi kontur penyebaran konsentrasi polutan dengan menunjukkan pola dispersi sesuai arah angin dominan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Titik dan Kondisi Pemantauan

Penelitian dilakukan di Jalan HMS Mintareja SH, sebuah jalan arteri utama di Kecamatan Cimahi Selatan Gambar 1. Data meteorologi selama pemantauan dapat terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Meteorologi Lokasi Pemantauan

Parameter	Konsentrasi	Satuan	Parameter	Konsentrasi	Satuan
Suhu	29.76	0C	Kelembaban	58,23	%
Kec. Angin	0,96 (Timur)	m/det	Tekanan	674,43	mmHg

Sumber : Hasil Uji Lab. Perumda Tirtawening, 2024

3.2 Hasil dan Pembahasan Kinerja Lalu Lintas

Pada bagian ini disajikan hasil analisis kinerja lalu lintas pada Jalan HMS Mintaredja SH yang diukur melalui *traffic counting* manual untuk menentukan *Degree of Saturation* (DS/VCR) sebagai dasar evaluasi emisi polutan kendaraan bermotor sesuai MKJI 1997.

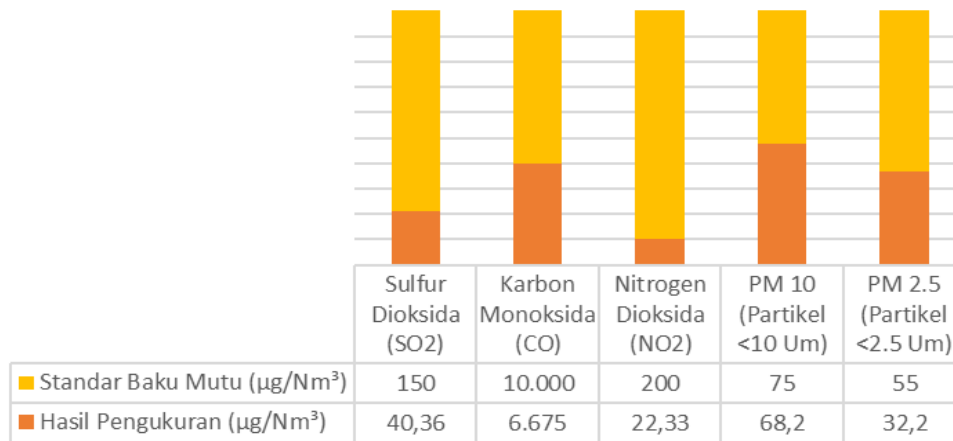
Kinerja lalu lintas di Kecamatan Cimahi Selatan masih berada pada batas toleransi dengan indikasi tidak terjadinya kemacetan, kecepatan kendaraan relatif tanpa hambatan, nilai derajat kejenuhan masih dalam batas aman ($<0,75$), dan LOS kategori "C". Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian pencemaran udara dari kendaraan bermotor masih bisa dikendalikan lebih mudah. Pembahasan ini sesuai dengan studi Faradila yang menunjukkan penurunan tingkat kenyamanan pada volume mendekati kapasitas [17]. Secara keseluruhan, pengelolaan lalu lintas di lokasi masih optimal sehingga memungkinkan pengendalian emisi kendaraan yang efektif.

Tabel 4 Hasil Pemantauan Kinerja Lalu Lintas

Hasil Perhitungan	X1			X2		Keterangan
	L1	L2	L3	L1	L2	
Hambatan Samping (/jam, 200m)	148	102	117	102	156	Kategori “L”
Kapasitas Jalan (smp)	3550,5			3271,5		2/3 TT
Volume Jalan (smp/jam)	1893,2			1817,3		
Hasil Perhitungan	X1			X2		Keterangan
VCR/DS	0,51			0,55		Batas aman (<0,75)
Kecepatan (km/jam)	34			33		Bebas Hambatan
LOS SMS (km/jam)				33,5		Kategori “D”
LOS VCR				0,55		Kategori “A”
LOS	LOS SMS ≥ 32 dan LOS VCR ≤ 0,80					Kategori “C”

3.3 Hasil Pemantauan Kualitas Udara dan Pembahasan

Pemantauan kualitas udara tepi jalan dilakukan untuk mengetahui konsentrasi parameter pencemaran udara tepi jalan khususnya di Kecamatan Cimahi Selatan.



Gambar 6 Grafik Perbandingan Hasil Pengukuran dan Standar Baku Mutu Kualitas Udara

3.3.1 Sulfur Dioksida

Sulfur dioksida (SO₂) di udara berasal dari pembakaran sulfur dalam bahan bakar diesel pada kendaraan berbahan bakar solar dan sumber tidak bergerak. SO₂ dihasilkan dari pembakaran sulfur dalam bahan bakar diesel (solar) melalui reaksi:



Mesin diesel tua menghasilkan emisi SO₂ lebih tinggi karena pembakaran yang kurang sempurna [18]. SO₂ dapat mengiritasi saluran pernapasan dan menurunkan fungsi paru, dengan gejala seperti batuk dan sesak napas [9]. Baku mutu udara untuk SO₂ selama 1 jam adalah 150 µg/Nm³ sesuai PP No. 22/2021 dan SNI 7119-7:2017. Penelitian di Kecamatan Cimahi Selatan menunjukkan kadar SO₂ sebesar 40,36 µg/Nm³, masih di bawah baku mutu yang ditetapkan. Dominasi sepeda motor berbahan bakar bensin dibanding kendaraan diesel ringan menjadi faktor utama rendahnya emisi SO₂, mengingat kadar sulfur dalam bensin lebih rendah dibandingkan solar [19]. Kondisi lalu lintas yang lancar dengan tingkat pelayanan jalan (LOS) kategori C dan kecepatan rata-rata 33,5 km/jam mengurangi emisi akibat pembakaran tidak sempurna [20]. Suhu udara yang tinggi (29,76°C) turut berkontribusi menurunkan konsentrasi SO₂ melalui proses pengenceran udara [21].

3.3.2 Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida (CO) adalah gas tak berwarna dan bau yang dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna bahan bakar fosil di kendaraan bermotor yang bereaksi seperti berikut :



Aktivitas kendaraan yang meningkat, terutama saat kemacetan akhir pekan, memicu kenaikan emisi CO [22]. Baku mutu udara CO selama 1 jam maksimal 10.000 µg/m³ sesuai PP No. 22/2021.

Penelitian di Kecamatan Cimahi Selatan menunjukkan konsentrasi CO sebesar 6.675 µg/Nm³, masih di bawah baku mutu yang ditetapkan. Emisi CO erat kaitannya dengan arus lalu lintas dan kecepatan kendaraan; pada arus yang stabil dan tanpa kemacetan, emisi CO cenderung menurun [20]. Pada derajat kejenuhan lalu lintas di atas 0,8, kemacetan menyebabkan peningkatan emisi CO akibat kondisi *stop-and-go* [23]. Penelitian ini mencatat derajat kejenuhan 0,51–0,55 yang termasuk kondisi arus stabil sehingga nilai CO tidak melebihi baku mutu. Faktor emisi yang digunakan mengacu pada Permen LHK No. 12/2010 berdasarkan klasifikasi jenis kendaraan tanpa diferensiasi eksplisit per kecepatan

operasional. Pada kondisi LOS C (kecepatan 33,5 km/jam) yang merupakan arus stabil, pendekatan ini masih relevan karena emisi CO memang lebih rendah pada arus lancar dibanding kondisi *stop-and-go* [8],[18]. Dominasi sepeda motor dengan usia mesin tua turut meningkatkan emisi CO akibat komponen mesin yang aus [24], meskipun nilai CO dalam penelitian ini masih berada dibawah baku mutu.

3.3.3 Nitrogen Dioksida (NO₂)

Nitrogen dioksida (NO₂) terutama berasal dari pembakaran pada kendaraan bermotor, terutama diesel, dan sangat beracun [25]. Konsentrasi NO₂ berbanding terbalik dengan suhu udara [26]. Persamaan reaksinya adalah sebagai berikut:



Baku mutu udara NO₂ selama 1 jam adalah 200 µg/Nm³ sesuai PP No. 22/2021. Penelitian di Kecamatan Cimahi Selatan menunjukkan nilai NO₂ sebesar 22,33 µg/Nm³, termasuk dalam kategori baik dan tidak melebihi baku mutu yang ditetapkan. Rendahnya nilai NO₂ dipengaruhi oleh dominasi kendaraan roda dua dibandingkan kendaraan berbahan bakar diesel [27]. Kondisi lalu lintas yang lancar dengan kecepatan rata-rata 33,5 km/jam dan derajat kejenuhan 0,51–0,55 mencegah penumpukan kendaraan dan pembakaran tidak sempurna yang menjadi sumber utama emisi NO₂ [20]. Hal ini sejalan dengan kajian yang menyatakan bahwa kecepatan kendaraan yang stabil berkorelasi negatif dengan emisi gas buang NO_x dari kendaraan bermotor [28].

3.3.4 Particulat Matter (PM₁₀ dan PM_{2.5})

Partikulat (PM) seperti debu dan jelaga terdiri dari berbagai ukuran, terutama PM₁₀ (<10 µm) dan PM_{2.5} (<2,5 µm) [29]. Menurut Marningot PM₁₀ biasanya berasal dari debu jalan dan proses mekanis, sedangkan PM_{2.5} dari pembakaran dan reaksi kimiawi di atmosfer [30]. Kecepatan kendaraan yang rendah dan kepadatan lalu lintas meningkatkan konsentrasi PM. Ban, kopling, dan rem kendaraan menyumbang sekitar 51% partikulat. Standar baku mutu udara ambien untuk parameter PM₁₀ dan PM_{2.5} di udara ambien secara berturut turut sebesar 75µg/Nm³ dan 55µg/Nm³ untuk waktu pengukuran selama 24 jam.

Penelitian di Kecamatan Cimahi Selatan menunjukkan konsentrasi PM₁₀ dan PM_{2.5} masing-masing sebesar 68,2 µg/Nm³ dan 32,2 µg/Nm³, masih di bawah baku mutu yang ditetapkan. Nilai ini dipengaruhi oleh rendahnya kepadatan kendaraan pada hari pengukuran yang sejalan dengan kondisi lalu lintas stabil kategori LOS C [31]. Kecepatan angin yang rendah (0,96 m/det) berperan dalam memperlambat dispersi partikel sehingga konsentrasi PM relatif tinggi meskipun masih dibawah baku mutu [21]. Kelembaban udara sebesar 58,23% menyebabkan partikel tetap tersebar tanpa penggumpalan yang signifikan, karena penggumpalan higroskopik partikel umumnya terjadi pada kelembaban di atas 80% [21].

3.4 Pemetaan Penyebaran Polutan CO dan PM₁₀ dengan model CALINE 4

Pemodelan kualitas udara di kawasan *roadside* sering difokuskan pada CO dan PM₁₀ karena kedua polutan ini merupakan indikator utama polusi dari lalu lintas kendaraan. CO dihasilkan dari pembakaran tak sempurna bahan bakar kendaraan bermotor dan menunjukkan korelasi langsung dengan intensitas lalu lintas, sementara PM₁₀ berasal dari emisi knalpot dan partikel debu jalan yang berdampak langsung pada kesehatan pernapasan. Studi menunjukkan CO dan PM₁₀ relatif lebih mudah diukur dan dimodelkan dengan akurat menggunakan model standar yang sudah teruji, menjadikannya fokus utama untuk pemantauan dan pengendalian udara di lingkungan jalan [32].

3.4.1 Data Meteorologi

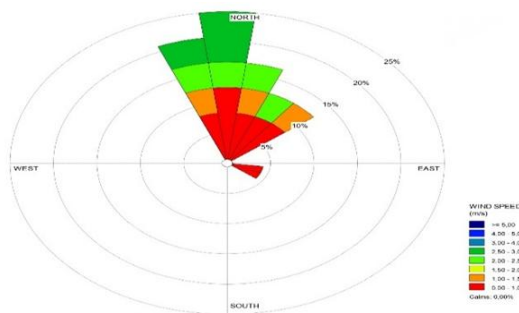
Dalam prediksi dispersi polutan yang akan dilakukan diperlukan beberapa data meteorologi pendukung yang dijelaskan dibawah ini.

3.4.1.1 Suhu Udara

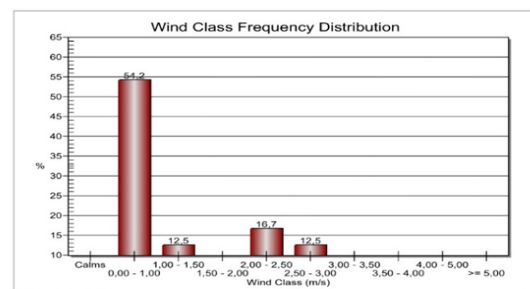
Suhu udara dapat memengaruhi stabilitas udara, terutama dalam proses dispersi zat pencemar. Dalam penelitian yang dilakukan Andriani *dkk* menjelaskan bahwa semakin tinggi suhu udara maka konsentrasi polutan cenderung semakin menurun serta sebaliknya jika konsentrasi rendah maka konsentrasi polutan akan meningkat [33]. Pada penelitian ini, suhu udara sebesar 29,76°C tergolong tinggi sehingga mendukung penyebaran polutan dan menurunkan konsentrasinya di udara.

3.4.1.2 Kecepatan dan Arah Angin

Dispersi polutan udara dipengaruhi oleh arah dan kecepatan angin yang menentukan pola penyebaran zat pencemar [34]. Kecepatan angin tinggi meningkatkan pencampuran dan menurunkan konsentrasi polutan, sedangkan angin lemah menyebabkan akumulasi polutan di sekitar sumber emisi. Kondisi ini memengaruhi sebaran CO dan PM₁₀ di wilayah perkotaan, terutama pada area *downwind* [35]. Karena data kecepatan dan arah angin pengukuran terbatas, digunakan data NASA POWER yang diunduh dari <https://power.larc.nasa.gov/> berdasarkan koordinat lokasi pengukuran untuk analisis dispersi selama 24 jam pada bulan Juni Tahun 2024 dan didapat nilai rata-rata kecepatan 1,275 m/s dan arah dominan 126,37°, selanjutnya dianalisis menggunakan WRPLOT View.[10].



Gambar 8 Windrose



Gambar 9 Distribusi Kecepatan Angin

Data windrose menunjukkan arah angin dominan bergerak dari utara ke timur laut dengan kecepatan rata-rata 0,13–2,7 m/detik dan kecepatan tertinggi sebesar 2,7 m/detik pada pukul 14.00. Kondisi calm wind (<1 m/s) terjadi sebesar 54,2% selama periode pengamatan, terutama pada malam hingga pagi hari, sehingga menghambat dispersi CO dan PM₁₀ dan menyebabkan polutan cenderung terakumulasi di sekitar sumber emisi. Arah angin dominan juga menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi polutan berpotensi terjadi pada area downwind sesuai arah aliran angin.

3.4.1.3 Stabilitas Atmosfer

Stabilitas atmosfer memengaruhi konsentrasi CO dan PM₁₀, dimana kondisi atmosfer stabil dapat meningkatkan akumulasi polutan [36]. asil analisis menggunakan WRPLOT View menunjukkan kecepatan angin rata-rata sebesar 1,22 m/s yang termasuk kelas 7 stabilitas atmosfer, yaitu kondisi sangat stabil dengan turbulensi rendah. Kondisi ini menyebabkan polutan sulit terdispersi sehingga konsentrasi lokal berpotensi meningkat [37].

3.4.1.4 Mixing Height

Mixing height adalah lapisan batas penyebaran polutan vertikal. Nilai 800 m digunakan sebagai input standar untuk kawasan urban dalam pemodelan CALINE-4 [38].

3.4.2 Data Lalu Lintas

Data kinerja lalu lintas berupa volume kendaraan yang melintasi Jl. HMS Mintaredja selama pengukuran digunakan sebagai dasar perhitungan beban emisi dan pemodelan penyebaran polutan sumber garis. Berdasarkan hasil pemantauan di Kecamatan Cimahi Selatan, diperoleh volume kendaraan rata-rata sebesar 7468 smp/jam yang merupakan akumulasi dari dua arah jalur. Volume kendaraan menjadi input utama dalam pemodelan dispersi polutan udara karena berperan sebagai faktor emisi primer yang memengaruhi konsentrasi polutan di udara. Berdasarkan data volume kendaraan tersebut, diperoleh beban emisi CO sebesar 11,97 g/mil dan PM₁₀ sebesar 0,122 g/mil.

3.4.3 Reseptor

Reseptor di model ini berfungsi sebagai titik evaluasi untuk menentukan sebaran dan dampak polutan seperti CO dan PM₁₀ yang berasal dari lalu lintas jalan [39]. Penggunaan titik reseptor sensitif penting dalam memodelkan dispersi CO dan PM₁₀ karena polutan ini berpotensi memberikan dampak kesehatan yang signifikan, terutama pada kelompok rentan.

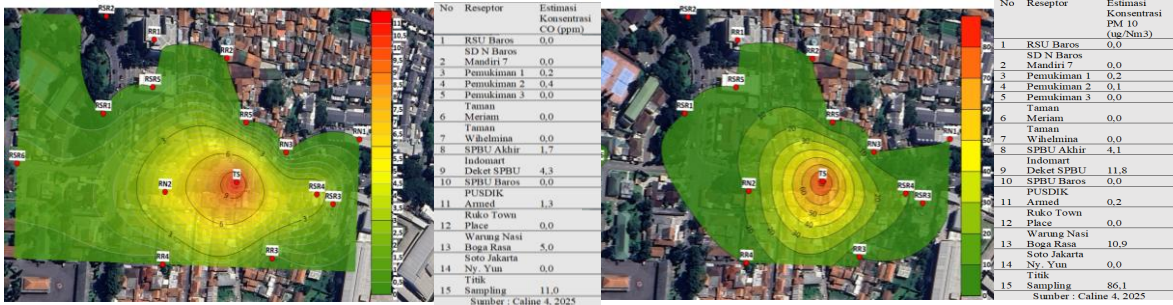
Tabel 9 Titik Reseptor Terpilih

Kode Receptor	Reseptor	Jarak (m)	Keterangan
RR1	RSU Baros	236	RS umum (prioritas kesehatan sensitif)
RR2	SD N Baros Mandiri 7	205	Sekolah dasar (anak-anak)
RR3	Pemukiman 1	150	Cluster rumah padat penduduk
RR4	Pemukiman 2	159	
RR5	Pemukiman 3	90	
RSR1	Taman Meriam	105	Ruang terbuka hijau publik
RSR2	Taman Wihelmina	320	
RSR3	SPBU Akhir	39,4	Pom bensin (risiko VOC)
RSR5	SPBU Baros	143	
RSR4	Indomart Deket SPBU	12,9	Minimarket komersial
RSR6	PUSDIK Armed	239	Pusat pendidikan militer
RN1	Ruko Town Place	56,9	Ruko komersial bertingkat
RN2	Warung Nasi Boga Rasa	21,6	Warung makan pinggir jalan
RN3	Soto Jakarta Ny. Yun	15,2	
TS	Titik Sampling	2,4	Titik referensi

Visualisasi posisi reseptor dan badan jalan pada pemodelan CALINE4 ditunjukkan pada Gambar 3, dimana reseptor ditandai dengan titik hijau dan badan jalan ditampilkan sebagai garis poligon berwarna biru. Berdasarkan arah angin dominan hasil WRPLOT View yang bergerak dari utara ke timur laut, reseptor RR1, RR2, RSR5, serta RN1 dan RN3 diperkirakan menerima paparan polutan lebih besar. Namun, karena kondisi angin dominan tergolong calm wind dengan stabilitas atmosfer yang stabil, reseptor yang berada paling dekat dengan badan jalan, yaitu RN2, RN3, RSR3, dan RSR4, berpotensi menerima konsentrasi polutan tertinggi.

3.5 Hasil Pemetaan

Setelah data data diatas terkumpul, dilakukan pemodelan dengan model CALINE 4 serta pemetaan menggunakan *Software Surfer 22*. Berikut hasil pemodelan serta pemetaan yang telah dilakukan.



Gambar 11 Pemetaan Dispersi Polutan CO dan PM 10

Berdasarkan hasil pemodelan CALINE 4, konsentrasi CO tertinggi ditemukan di beberapa titik reseptor *downwind* dari sumber emisi utama di Jalan HMS Mintaredja, seperti Titik Sampling (11 ppm), Indomart Deket SPBU (4,3 ppm), dan Warung Nasi Boga Rasa (5,0 ppm) yang sesuai dengan arah angin dominan dari utara ke timur laut dengan kecepatan maksimal 2,7 m/ [10]. Arah dan kecepatan angin rendah, termasuk *calm wind* >50%, membatasi dispersinya sehingga akumulasi CO terjadi di wilayah tersebut [40],[21]. Kondisi atmosfer stabil (kelas 7) dan pengaruh bangunan serta vegetasi menciptakan turbulensi mikro yang memperbesar akumulasi CO terutama pada jalur padat kendaraan [37],[41]. Dominasi kendaraan roda dua dan kendaraan ringan signifikan dalam emisi CO. Model ini konsisten dengan kondisi lapangan dan menegaskan peran penting faktor meteorologi dan lingkungan lokal.

Untuk PM₁₀, konsentrasi tertinggi (86,1 µg/Nm³) juga terdapat di titik sampling dan daerah pemukiman *downwind*, mengikuti pola angin yang sama [10]. *Calm wind* 54,2% memperlambat penyebaran partikulat, meningkatkan akumulasi PM₁₀ di sekitar sumber [42]. Lingkungan lokal memperparah konsentrasi partikulat, terutama di area pemukiman [41],[43]. Volume lalu lintas tinggi dengan dominasi kendaraan roda dua dan ringan menjadi sumber utama emisi PM₁₀. Penyesuaian faktor emisi PM₁₀ sebesar 1 g/mil digunakan karena keterbatasan CALINE 4 dalam mengolah faktor desimal, fokus pada pola sebaran relatif dan identifikasi titik konsentrasi tinggi [44]. Secara keseluruhan, arah angin dominan dan *calm wind* merupakan faktor utama dalam akumulasi polutan di reseptor *downwind*, meningkatkan risiko paparan masyarakat.

Perlu dicatat bahwa pemodelan ini hanya memperhitungkan emisi sumber garis lalu lintas, tanpa memasukkan background concentration dari cerobong industri di sekitar Kecamatan Cimahi Selatan. Studi perbandingan CALINE-4 di kawasan industri menunjukkan bahwa sumber titik (industri) berkontribusi 14–32% pada konsentrasi PM₁₀ aktual [46], mengindikasikan konsentrasi di titik reseptor kemungkinan lebih tinggi dari hasil simulasi. Integrasi *background concentration* dari sumber industri merupakan batasan penelitian ini dan direkomendasikan sebagai pengembangan selanjutnya [12].

3.6 Validasi Model

Validasi dilakukan dengan membandingkan langsung konsentrasi simulasi CALINE-4 pada Titik Sampling terhadap hasil pengukuran lapangan di lokasi yang sama, menggunakan MAPE sebagai ukuran akurasi relatif model terhadap kondisi aktual Cimahi Selatan [14]. Berikut hasil analisis validasi model untuk Jl. HMS Mintaredja:

Tabel 10 Analisis Validasi Model CO dan PM10

Titik	Parameter	Hasil Model	Hasil Lapangan	% MAPE
Jl. HMS	CO (ppm)	11,0	5,28	47%
Mintaredja	PM10 (ug/Nm3)	86,1	68,20	21%

Nilai MAPE CO sebesar 47% termasuk kesalahan model yang moderat hingga cukup tinggi, menunjukkan perlunya kalibrasi lebih lanjut agar prediksi konsentrasi CO lebih akurat, karena kesalahan dapat berasal dari ketidakakuratan input emisi, kondisi meteorologi, atau parameter model [46]. Sementara itu, MAPE PM₁₀ sebesar 21% tergolong cukup baik dan menunjukkan model mampu merepresentasikan konsentrasi partikulat dengan kesalahan yang dapat diterima, mengingat pengaruh kuat faktor meteorologi dan aktivitas manusia pada dispersinya [47]. Secara umum, nilai MAPE ini mencerminkan kebutuhan optimalisasi data dan kalibrasi dalam pemodelan kualitas udara lokal agar hasilnya lebih mewakili kondisi nyata.

3.7 Skenario Mitigasi

Dua skenario hipotetis dikaji berdasarkan hasil pemodelan. Skenario peningkatan volume kendaraan 20% diproyeksikan meningkatkan konsentrasi PM₁₀ hingga berpotensi melampaui baku mutu, terutama pada kondisi calm wind dominan (54,2%), karena konsentrasi dalam CALINE-4 berbanding lurus dengan beban emisi [12]. Sementara itu, penerapan sabuk hijau di tepi jalan diperkirakan mampu mereduksi PM₁₀ sebesar 5–23% [48], meskipun pada kondisi calm wind efektivitasnya cenderung lebih rendah. Karena CALINE-4 belum memodelkan efek vegetasi secara langsung, diperlukan kajian lanjutan menggunakan ENVI-met untuk hasil yang lebih akurat.

4. KESIMPULAN

Evaluasi kualitas udara ambien tepi jalan di Kecamatan Cimahi Selatan menunjukkan konsentrasi parameter SO₂, CO, NO₂, PM₁₀, dan PM_{2.5} masing-masing sebesar 40,36; 6.675; 22,33; 68,20; dan 32,20 µg/Nm³. Nilai ini masih dibawah standar baku mutu PP RI No. 22 Tahun 2021. Kinerja lalu lintas di lokasi pemantauan berada pada tingkat pelayanan (LOS) C, yang menunjukkan arus lalu lintas stabil dengan perlambatan yang masih dapat diterima. Prediksi dispersi polutan CO dan PM₁₀ menunjukkan konsentrasi tertinggi di area *downwind*, dipengaruhi kecepatan angin rendah, volume lalu lintas tinggi, dan kondisi lingkungan yang memperlambat penyebaran. Dinas Lingkungan Hidup Kota Cimahi melakukan berbagai upaya pengendalian termasuk regulasi, pengelolaan transportasi, kampanye kesadaran, pemantauan kualitas udara, *car free day*, uji emisi kendaraan, kegiatan *earth hour*, energi terbarukan, dan pengawasan dokumen lingkungan. Disarankan untuk menambah titik pemantauan kualitas udara di Kecamatan Cimahi Selatan, khususnya pada zona reseptor sensitif seperti sekolah, fasilitas kesehatan, dan permukiman padat. Pemantauan secara berkala pada periode hari kerja dan akhir pekan serta musim hujan dan kemarau juga perlu dilakukan untuk memperoleh gambaran sebaran konsentrasi polutan yang lebih komprehensif sebagai dasar pengambilan kebijakan pengendalian kualitas udara di wilayah tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2021 Nomor 32.*
- [2] M. H. Fahmi, “Analisis kualitas udara ambien di Kota Lhokseumawe,” Universitas Islam Negeri (UIN) Ar-Raniry, 2019.
- [3] S. Gulia, S. M. Shiva Nagendra, M. Khare, and I. Khanna, “Urban air quality management-A review,” *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 286–304, Mar. 2015, doi: 10.5094/APR.2015.033.
- [4] I. Anjarsari, I. Munfarida, and R. D. N. Setyowati, “Evaluasi kualitas udara karbon monoksida akibat lalu lintas kendaraan bermotor,” *Sistem: Jurnal Ilmu-Ilmu Teknik*, vol. 15, no. 1, pp. 30–40, 2019.
- [5] P. Huangfu and R. Atkinson, “Long-term exposure to NO₂ and O₃ and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis,” *Environ. Int.*, vol. 144, p. 105998, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105998.
- [6] World Health Organization, “WHO global air quality guidelines,” Geneva, 2021.
- [7] I. Indrayani and S. Asfiati, “Pencemaran Udara Akibat Kinerja Lalu-Lintas Kendaraan Bermotor Di Kota Medan,” *Jurnal Permukiman*, vol. 13, no. 1, p. 13, May 2018, doi: 10.31815/jp.2018.13.13-20.
- [8] A. Sasmita, M. Reza, S. Elystia, and Syarah Adriana, “Analisis Pengaruh Kecepatan Dan Volume Kendaraan Terhadap Emisi Dan Konsentrasi Karbon Monoksida Di Jalan Jenderal Sudirman, Kota Pekanbaru,” *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 16, no. 4, pp. 269–279, May 2022, doi: 10.24002/jts.v16i4.5452.
- [9] A. Masito, “Risk Assessment Ambient Air Quality (NO₂ And SO₂) and The Respiratory Disorders to Communities in the Kalianak Area of Surabaya,” *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, vol. 10, no. 4, p. 394, Dec. 2018, doi: 10.20473/jkl.v10i4.2018.394-401.
- [10] F. Muchtar, “Analisis Emisi Kendaraan Berbasis Model CALINE4 di Jalan Nasional pada Kawasan Mamminasata,” Universitas Hasanuddin, Makassar, 2018.
- [11] F. Abdullah, *Analisis Konsentrasi Udara Abien CO di Jalan Alternatif Car Free Day Kota Makassar Menggunakan Program CALINE4*. Makassar: Departemen Teknik Lingkungan FT-UH, 2018.
- [12] P. Benson, *CALINE-4: A Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Concentrations Near Roadways*. Sacramento: California Department of Transportation Report, 1989.
- [13] SNI 19-7119.9-2005 tentang Udara Ambien - Bagian 9: Penentuan Lokasi Pengambilan Contoh Uji Pemantauan Kualitas Udara Roadside
- [14] N. A. Pradana, “Analisis Faktor Emisi Gas CO dalam Emisi Kendaraan Bermotor,” Universitas Brawijaya, Malang, 2024.
- [15] Direktorat Jenderal Bina Marga, “Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI),” *Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta.*, 1997.
- [16] G. N. Miftahuddin, “Analisis dispersi particulate matter 10 (PM₁₀) di kawasan perkotaan Yogyakarta menggunakan pemodelan AERMOD,” Universitas Islam Indonesia, 2025.
- [17] I. Faradila, “Analisis Kinerja Ruas Jalan Perkotaan Menggunakan Derajat Kejenuhan di Jalan Adi Sucipto dan Jalan Brawijaya,” *Spektrum Sipil*, vol. 9, no. 2, 2022.
- [18] S. Sudalma, P. Purwanto, and L. W. Santosa, *Model Sebaran SO₄²⁻ dan NO₃⁻ dalam Air Hujan di Kota Semarang*. Semarang: Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro, 2018.

- [19] A. Akib, L. Basri, and M. Thahir, “Kajian polusi kendaraan berdasarkan bahan bakar yang dipakai oleh kendaraan di Makassar,” *Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, vol. 8, no. 1, pp. 1508–1517, Jan. 2025, doi: 10.31004/jutin.v8i1.42153.
- [20] D. Permatasari, “Pengaruh Tingkat Pelayanan Jalan terhadap Polusi CO di Jl. Raya Buduran-Jl. A. Yani Kabupaten Sidoarjo,” Universitas Brawijaya, Malang, 2019.
- [21] D. I. Musa, M. Aryono Adhi, and Adi Mulsandi, “Spatio-Temporal Dynamics of Extreme PM2.5 in Indonesia: A Weather-Based Hybrid Modeling Approach,” *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, vol. 26, no. 1, pp. 37–54, Dec. 2025, doi: 10.31172/jmg.v26i1.1163.
- [22] N. Nirmalasari and N. Satriani, “Vehicle Volume And Carbon Monoxide And Nitrogen Oxide Emissions On Weekdays And Weekends On Anggajaya Street, Sleman,” *JURNAL KESEHATAN LINGKUNGAN: Jurnal dan Aplikasi Teknik Kesehatan Lingkungan*, vol. 22, no. 1, pp. 109–114, Jan. 2025, doi: 10.31964/JKL.V22I1.939.
- [23] A. L. N. Hakim, A. Prasetyo, and S. Nugroho, “Kinerja simpang tak bersinyal berdasarkan derajat kejenuhan pada jalan raya,” *Mitrans: Jurnal Media Publikasi Terapan Transportasi*, vol. 1, no. 1, pp. 19–24, 2023.
- [24] C. P. Lupita, Sudarno, and T. Istirokhatun, “Analisis pengaruh umur mesin, periode servis dan jarak tempuh terhadap konsentrasi emisi CO, NOx, HC dan CO₂ pada sepeda motor tipe sport (studi kasus: motor Yamaha Vixion),” *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 2, no. 4, pp. 1–9, 2013.
- [25] L. Novitriana, D. Handayani, and M. Hasbi, “Analisis emisi gas buang kendaraan bermotor akibat volume lalu lintas di ruas jalan (studi kasus Jalan Slamet Riyadi Surakarta),” *Matriks Teknik Sipil*, vol. 5, no. 2, pp. 752–760, 2017.
- [26] W. A. Y. Ponco, *Emisi Partikulat Kendaraan Bermotor dan Dampak Kesehatan. Cetakan I*. Malang: UB Press, 2016.
- [27] A. U. Hasanah, K. I. Lutfia, N. I. Wantoputri, and R. D. Kusumawati, “Analisis Dispersi SO₂ dan NO₂ di Kawasan Budaya Kota Yogyakarta Menggunakan Model AERMOD,” *AJIE*, pp. 153–168, Aug. 2025, doi: 10.20885/ajie.vol9.iss3.art2.
- [28] F. HUMAMI, M. Julianti, and P. Rusmandani, “analisis emisi gas buang kendaraan komersial berdasarkan tipe karakteristik kendaraan bermotor,” *Jurnal Permadi: Perancangan, Manufaktur, Material dan Energi*, vol. 6, no. 01, pp. 48–59, Jan. 2024, doi: 10.52005/PERMADI.V6I01.141.
- [29] D. A. Vallero, *Fundamentals of Air Pollution (4th ed.)*. Oxford: Academic Press, 2014.
- [30] T. , N. , S. Marningot, “Pengaruh Hari Bebas Kendaraan Bermotor di Bundaran HI,” Universitas Sahid Jakarta, 2017.
- [31] Direktorat Jenderal Bina Marga, “Pedoman kapasitas jalan Indonesia (PKJI),” 2014.
- [32] A. Mahalana, L. Yang, T. Dallmann, P. Lestari, K. Maulana, and N. Kusuma, “Pengukuran emisi kendaraan bermotor real-world di Jakarta, Indonesia,” 2022.
- [33] R. Andriani, Nurhasanah, and R. Adriat, “Konsentrasi karbon monoksida (CO) di Kota Pontianak,” *Positron: Jurnal Ilmu Fisika dan Teknologi*, vol. 10, no. 1, pp. 1–10, 2020.
- [34] I. Muflihah, “Aplikasi Model Dispersi Pencemar Konservatif dari Aktivitas Lalu Lintas di Wilayah Surabaya Timur Menggunakan Model Gauss Termodifikasi,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.
- [35] B. Ristianto, D. Muhammad, and Rosyani, “Analisis sebaran particulate matter (PM10) dan gas carbon dioxide (CO) dari aktivitas kendaraan bermotor menggunakan metode HYSPLIT Version 5 di Kota Jambi,” *Jurnal Pembangunan Berkelanjutan*, vol. 4, no. 1, pp. 54–63, 2021.
- [36] “Night-time clues to pollution,” *Nat. Geosci.*, vol. 16, no. 3, pp. 193–193, Mar. 2023, doi: 10.1038/s41561-023-01157-8.

- [37] Q. Li, H. Zhang, X. Cai, Y. Song, and T. Zhu, "The impacts of the atmospheric boundary layer on regional haze in North China," *NPJ Clim. Atmos. Sci.*, vol. 4, no. 1, p. 9, Feb. 2021, doi: 10.1038/s41612-021-00165-y.
- [38] Melissa, "Validasi dan Aplikasi Model Caline 4 Pada Ruas Jalur Trans Jakarta Busway," Bandung, Institut Teknologi Bandung, 2007.
- [39] D. Octarinie, R. Riduan, and R. M. Khair, "Simulasi model dispersi konsentrasi PM10 dari sumber lalu lintas di SDN Nusa Indah 1 Kecamatan Bati-Bati," *Jukung Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 7, no. 2, pp. 1–12, 2021.
- [40] A. I. Ibrahim and F. Rosariawari, "Analisis Radius Persebaran (Dispersi) Karbon Monoksida di Jalan Raya Darmo Kota Surabaya," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 9084–9095, 2024.
- [41] J. Prakash, S. Choudhary, R. Raliya, T. Chadha, J. Fang, and P. Biswas, "PM sensors as an indicator of overall air quality: Pre-COVID and COVID periods," *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 13, no. 11, p. 101594, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.apr.2022.101594.
- [42] F. D. K. Azizah, "Perbedaan Dispersi Polutan Karbon Monoksida (CO) pada Ruas Jalan," UIN Sunan Ampel Surabaya, Surabaya, 2023.
- [43] M. Muhaniroh and R. Syech, "Analisis Pengaruh Suhu Udara, Curah Hujan, Kelembaban Udara dan Kecepatan Angin terhadap Arah Penyebaran dan Akumulasi Particulate Matter (PM10): Studi Kasus Kota Pekanbaru," *Komunikasi Fisika Indonesia*, vol. 18, no. 1, p. 48, Mar. 2021, doi: 10.31258/jkfi.18.1.48-57.
- [44] J.-B. Kim, Z. Yu, and H. Zhang, "Can media exposure improve stock price efficiency in China and why?," *China Journal of Accounting Research*, vol. 9, no. 2, pp. 83–114, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.cjar.2015.08.001.
- [45] B. M. Prakash, S. Majumder, M. Swamy, and S. Mahesh, "Prediction of Air Pollutant Dispersion from Point and Line Sources and Validation of ISCST3 and CALINE4 Model Data with Observed Values in the Industrial Area of Mysuru," 2017, doi: 10.15680/IJIRSET.2017.0609121.
- [46] I. Zulfa, "Pemodelan Kandungan Particulate Matter 10 dan 2.5 di DKI Jakarta Menggunakan ARIMA.," UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, Jakarta, 2015.
- [47] M. Maulydia, "Analisis Konsentrasi PM10 dan PM2.5 di Kawasan Pasar Kota Pariaman," Universitas Andalas, Padang, 2024.
- [48] X. Chen, X. Wang, X. Wu, J. Guo, and Z. Zhou, "Influence of roadside vegetation barriers on air quality inside urban street canyons," *Urban For. Urban Green.*, vol. 63, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.UFUG.2021.127219.