Journal of Engineering Environtmental Energy and Science
Vol.5, No.2, Juni 2026, pp. 123 - 138
e-ISSN : 2828-6170

Pendekatan Pemodelan Untuk Analisis Dampak Lingkungan Sektor Transportasi: Studi Kasus Emisi Gas Buang dan Resuspensi Kendaraan Bermotor

Surya Adi Wicaksono[*1], Nurul Khasanah[2], Naisya Abtharis[3], Ibnu Susanto J[4]
[1,3]Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, UBJ, Jakarta, Indonesia
[2]Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, UNDIP, Semarang, Indonesia
[4]Magister Sains Keberlanjutan, Fakultas Perencanaan Infrastruktur, Universitas Pertamina, Jakarta, Indonesia
e-mail: [*1]**surya.aw@dsn.ubharajaya.ac.id**

Abstract

The transportation sector is a major contributor to air pollution, both from exhaust emissions and resuspended road dust generated by vehicle movement. This study aims to assess the potential environmental impact of transportation emissions from a planned operational activity at PT XYZ through dispersion modeling using AERMOD. The emission rate was calculated using fuel consumption–based exhaust emission factors and resuspension estimates following the U.S. EPA AP-42 methodology. The calculated emission rates were then used as input for simulating the spatial distribution of pollutants under two meteorological scenarios: the dry season and the wet season. The results indicate that the highest concentrations occur near the traffic corridor and decrease with increasing distance from the source, following a Gaussian-based line source dispersion pattern. Resuspension emissions contributed more significantly to particulate concentrations compared to exhaust emissions, particularly during the dry season. Overall, the findings demonstrate that dispersion modeling serves as an effective approach to estimate potential air quality impacts in the planning phase of transportation activities and may support decision-making for air pollution mitigation strategies.

Keywords: *Emission, Vehicle, Udara*

Abstrak

Sektor transportasi merupakan salah satu kontributor utama pencemaran udara, baik melalui emisi gas buang maupun resuspensi partikulat dari aktivitas kendaraan bermotor. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi dampak emisi transportasi dari rencana kegiatan operasional PT. XYZ dengan pendekatan pemodelan dispersi udara menggunakan AERMOD. Perhitungan laju emisi dilakukan berdasarkan faktor emisi gas buang berbasis konsumsi bahan bakar dan resuspensi kendaraan menggunakan metode AP-42 U.S. EPA. Selanjutnya, nilai beban emisi digunakan sebagai *input* model untuk mensimulasikan distribusi spasial konsentrasi polutan pada dua periode meteorologi, yaitu musim hujan dan musim kemarau. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa konsentrasi polutan tertinggi terjadi di sekitar jalur lalu lintas dan menurun seiring bertambahnya jarak dari sumber. Emisi resuspensi memberikan kontribusi yang lebih besar terhadap konsentrasi partikulat dibandingkan emisi gas buang, khususnya pada musim kemarau. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa pemodelan dispersi udara dapat memberikan gambaran kuantitatif mengenai potensi dampak emisi transportasi sebelum kegiatan berjalan, sehingga dapat digunakan sebagai dasar perencanaan mitigasi pencemaran udara.

Kata Kunci: Emisi, Kendaraan, Udara

PENDAHULUAN

Transportasi merupakan sektor penting dalam pertumbuhan ekonomi, mobilitas maupun barang dan jasa. Di Indonesia sektor transportasi menjadi salah satu penyumbang utama emisi yang menyebabkan pencemaran udara dengan menyumbang sekitar 20% dari total konsumsi energi final nasional (Purnomoasri & Handayani, 2022). Menurut laporan *Indonesia Sustainable Mobility Outlook* (ISMO) 2025 sebesar 80% emisi dari sektor transportasi berasal dari subsektor transportasi jalan yang

Submitted: **20/05/2026**; Revised: **2/06/2026**; Accepted: **10/06/2026**; Published: **30/06/2026**
didorong oleh tingginya mobilitas mobil penumpang pribadi, angkutan barang, dan sepeda motor. Akibatnya, emisi dari transportasi jalan didominasi oleh mobil (35%), diikuti oleh angkutan barang (30%), sepeda motor (28%), dan bus (6%). Berdasarkan data dari Kementerian Perindustrian tahun 2021, terdapat 22 perusahaan yang bergerak di bidang industri roda empat, dengan kapasitas produksi total hingga 2,35 juta per tahun. Sedangkan berdasarkan analisis data Badan Pusat Statistik, sektor transportasi mengalami peningkatan jumlah unit kendaraan bermotor di Indonesia sebanyak 105 juta pada tahun 2015 dan menjadi 148 juta pada tahun 2022 dengan rata rata peningkatan sebesar 5% per tahun. Dengan begitu sektor energi dan transportasi mendominasi emisi sebesar 50,6% dari total emisi di Indonesia pada tahun 2022.

Pertumbuhan jumlah unit transportasi tentu akan meningkatkan emisi yang dihasilkan. Kendaraan bermotor menghasilkan emisi gas buang pembakaran dan non-pembakaran, seperti karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NOx), sulfur dioksida (SO_2), serta karbon dioksida (CO_2) yang berkontribusi terhadap perubahan iklim dan penurunan kualitas udara serta menjadi penyumbang signifikan partikel padat atau partikulat di udara seperti PM2,5 dan PM10. sumber gas buang emisi partikulat dari aktivitas kendaraan juga dihasilkan dari resuspensi debu atau material lepas di permukaan jalan yang terangkat kembali ke udara akibat aktivitas lalu lintas dan emisi akibat keausan rem serta ban kendaraan (EPA, 2011). Studi menyebutkan bahwa keausan rem dapat menyumbang hingga 55% dari total emisi PM10 terkait lalu lintas yang bukan berasal dari gas buang dan hingga 21% dari total emisi PM10 terkait lalu lintas dari transportasi jalan (Grigoratos & Martini, 2017). Berdasarkan penelitian lain, Polutan partikulat seperti PM2,5 dan PM10 secara medis telah terbukti meningkatkan risiko penyakit pernapasan akut seperti asma dan eksaserbasi bronkitis, serta penyakit kardiovaskular seperti stroke dan penyakit jantung koroner. NOx dan SOx, selain langsung berbahaya bagi saluran pernapasan, juga berpotensi membentuk hujan asam yang merusak ekosistem, memperburuk kualitas tanah, dan merusak infrastruktur. Sementara itu, karbon monoksida (CO) mampu mengikat hemoglobin dan mengganggu transportasi oksigen dalam darah, yang dapat menyebabkan gangguan paru-paru, defisiensi oksigen dan paparan kronik, membebani fungsi kardiovaskular. Secara keseluruhan, efek ini bukan hanya berdampak langsung pada kesehatan manusia tetapi juga menurunkan kualitas udara dan mempercepat perubahan iklim lewat peningkatan gas rumah kaca dan degradasi lingkungan (Khan et al., 2026).

Pemodelan merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengevaluasi atau memperkirakan besarnya dampak dari suatu aktivitas tertentu (Einstein, 2010). Dalam sektor transportasi, besaran dampak emisi udara dapat diprediksi berdasarkan tingkat aktivitas, seperti jenis bahan bakar, jumlah kendaraan, lama operasi, serta kondisi mesin yang dapat dipengaruhi oleh karakteristik geografis seperti topografi jalan, kondisi jalan, dan faktor meteorologi (Grigoratos & Martini, 2017). Salah satu model yang banyak digunakan untuk menggambarkan penyebaran konsentrasi polutan di udara ambien adalah *Gaussian Plume Model* yang secara matematis memanfaatkan distribusi Gaussian untuk menghitung konsentrasi polutan pada berbagai titik dengan mempertimbangkan kecepatan angin dan sifat sumber emisi (KLH, 2007). Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa model dispersi ini efektif untuk mengevaluasi sebaran emisi baik dari sumber bergerak maupun stasioner, sehingga mampu memprediksi pola distribusi emisi gas buang pada sektor transportasi (M. Taffarel Faridzi Naufal et al., 2023).

Dengan demikian, penggunaan model dispersi udara sangat relevan dalam kajian pencemaran udara akibat aktivitas transportasi. Melalui pendekatan pemodelan, dapat diperoleh gambaran mengenai distribusi spasial konsentrasi polutan di udara ambien sehingga memungkinkan prediksi perubahan kondisi lingkungan akibat adanya sumber emisi baru. Dalam penelitian ini, kajian difokuskan pada pemodelan dispersi polutan partikulat yang meliputi *Total Suspended Particulate* (PM), *Particulate Matter* berukuran kurang dari 10 mikrometer (PM_{10}), dan *Particulate Matter* berukuran kurang dari 2,5 mikrometer ($PM_{2,5}$). Ketiga parameter tersebut dipilih karena merupakan komponen utama pencemar udara yang berkaitan erat dengan aktivitas transportasi, baik yang berasal dari emisi gas buang kendaraan maupun sumber non-gas buang seperti resuspensi debu ban kendaraan.

Sebagai studi kasus, penelitian ini dilakukan pada kegiatan PT. XYZ yang akan melaksanakan kegiatan baru dengan ritase kendaraan operasional tertentu setiap harinya. Aktivitas transportasi tersebut berpotensi meningkatkan emisi partikulat ke lingkungan sekitar, sehingga diperlukan kajian pemodelan dispersi menggunakan pendekatan Gaussian Line Source untuk memprediksi distribusi konsentrasi PM,

PM_{10}, dan $PM_{2,5}$ di udara ambien. Hasil pemodelan diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kontribusi aktivitas transportasi terhadap kualitas udara serta digunakan sebagai dasar dalam memprediksi kondisi rona lingkungan setelah kegiatan berlangsung.

METODE PENELITIAN

Emisi gas buang yang dianalisis berasal dari studi kasus kegiatan PT. XYZ, kegiatan PT. XYZ pada saat operasional berencana akan melakukan kegiatan transportasi sebanyak 200 ritase kendaraan per hari. Adanya kegiatan transportasi tersebut diperkirakan akan menyebabkan penurunan kualitas udara karena peningkatan pencemaran udara akibat dari gas buang kendaraan dan resuspensi kendaraan bermotor. Perhitungan prakiraan kualitas udara akan dilakukan dengan menggunakan pendekatan faktor emisi. Faktor emisi merupakan nilai perkiraan yang menggambarkan jumlah polutan yang dilepaskan dari suatu sumber emisi untuk setiap unit aktivitas tertentu. Besarnya faktor emisi biasanya dinyatakan dalam satuan massa polutan per satuan berat, volume, jarak, atau waktu dari aktivitas yang menghasilkan emisi tersebut (KLH, 2007).

Perhitungan Beban Emisi

Beban Emisi Gas Buang

Emisi yang bersumber dari aktivitas lalu lintas terdiri atas campuran polutan gas dan partikulat dari pembakaran bahan bakar dan penguapan pelumas dalam emisi gas buang. Selain itu, aktivitas transportasi mengemisikan partikulat yang bersumber dari abrasi mekanis rem dan ban, erosi permukaan jalan dan resuspensi campuran debu yang terkumpul di permukaan jalan serta senyawa organik yang mudah menguap dari hilangnya bahan bakar karena penguapan dan pelepasan pelarut (Fussell et al., 2022). Perhitungan emisi gas buang mengacu pada pendekatan berbasis konsumsi bahan bakar, komponen pentingnya mengacu pada total konsumsi bahan bakar kendaraan dan faktor emisi pembakaran. Konsumsi bahan bakar dikaji berdasarkan panjang jalan yang dikaji. Perhitungan beban emisi dengan pendekatan konsumsi bahan bakar secara matematis dinyatakan sebagai berikut:

$$E = Konsumsi\ bahan\ bakar\ \left(\frac{liter}{hari}\right) \times Faktor\ emisi\ \left(\frac{g}{liter}\right) \quad (1)$$

Berikut merupakan tabel faktor emisi pembakaran solar pada truk:

Tabel 1 Faktor Emisi

Parameter	Faktor Emisi
	g/liter
PM*	1,246
PM_{10}+	0,139

Sumber :

* *Appendix B Emission Conversion Factor (Australian Transport Assessment and Planning)*
+Coronair, 2009

Resuspensi Kendaraan

Resuspensi kendaraan menjadi salah satu sumber emisi partikulat *non–exhaust* yang terjadi akibat interaksi antara ban kendaraan, permukaan jalan, serta partikel debu dari permukaan jalan. Dalam inventarisasi emisi, resuspensi tetap perlu dihitung meskipun tidak berasal dari proses pembakaran karena berperan besar dalam penurunan kualitas udara ambien. Perhitungan beban emisi partikulat dengan pendekatan *Vehicle Kilometer Trip* (VKT) mengacu pada (EPA, 2011) dinyatakan sebagai berikut:

$$E = VKT \times EF \quad (2)$$

Keterangan:

$$E = Beban\ emisi\ partikulat\ \left(\frac{g}{tahun}\right)$$

$$TP = VKT = Jarak\ tempuh\ kendaraan\ tahunan\ \left(\frac{km}{tahun}\right)$$

$$VKT = Panjang\ jalan\ (km) \times \frac{(Jumlah\ kendaraan)}{hari} \times \frac{hari}{tahun} \quad (3)$$

Submitted: **20/05/2026**; Revised: **2/06/2026**; Accepted: **10/06/2026**; Published: **30/06/2026**

$$EF = Faktor\ emisi\ \left(\frac{gr}{VMT}\right)$$

$$EF = k \times (sL)^a \times (W)^b \quad (4)$$

Dengan:

k = *Particle size multiplier*

$= PM2{,}5 = 0{,}15 \frac{g}{VKT} (paved\ road)$

$= PM10 = 0{,}62 \frac{g}{VKT}$

$= PM = 3{,}23 \frac{g}{VKT}$

a,b = Konstanta (a = 0,91; b = 1,02)

W = *Average weight (tons) of vehicle*

W *loaded* $= 30\ tons$

sL = *silt Loading*

Besaran Dampak Berdasarkan Sebaran Emisi

Berdasarkan beban emisi yang telah dihitung pada tahap sebelumnya, langkah selanjutnya adalah melakukan pemodelan sebaran polutan untuk mengetahui potensi dampak lingkungan menggunakan perangkat lunak AERMOD. Pemodelan dilakukan untuk mensimulasikan konsentrasi polutan di udara ambien pada area studi dengan mempertimbangkan kondisi meteorologi 3 tahun terakhir yang ada di lokasi kajian. Oleh karena itu, data meteorologi merupakan komponen penting dalam simulasi AERMOD untuk menghasilkan prediksi konsentrasi yang mendekati kondisi aktual di lapangan. Berikut parameter meteorologi yang dibutuhkan:

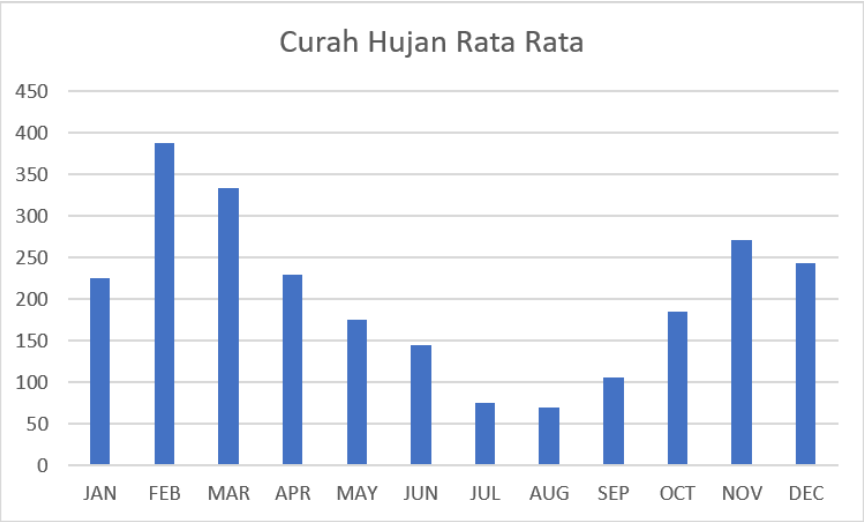
1. Kecepatan Angin
   Kecepatan angin berperan dalam mengendalikan proses transport dan pengenceran polutan. Semakin tinggi kecepatan angin, semakin cepat polutan terbawa menjauhi sumber dan semakin besar proses pengenceran yang terjadi, sehingga konsentrasi polutan di sekitar sumber cenderung menurun. Sebaliknya, kondisi angin lemah dapat menyebabkan akumulasi polutan di sekitar sumber emisi (Amran et al., 2024).
2. Arah Angin
   Arah angin menentukan lintasan *plume* atau jalur penyebaran polutan dari sumber menuju wilayah penerima. Distribusi spasial konsentrasi polutan pada hasil pemodelan umumnya mengikuti pola arah angin dominan di lokasi penelitian. Dengan demikian, wilayah yang berada searah dengan arah angin dominan akan berpotensi menerima konsentrasi polutan lebih tinggi dibanding wilayah lainnya (Assegaf, 2018).
3. Suhu Udara
   Suhu udara mempengaruhi stabilitas atmosfer dan pembentukan turbulensi. Pemanasan permukaan bumi pada siang hari dapat meningkatkan konveksi dan turbulensi atmosfer sehingga dispersi vertikal polutan menjadi lebih kuat. Sebaliknya, kondisi atmosfer yang stabil, misalnya pada malam hari atau saat terjadi inversi temperatur, dapat membatasi pencampuran vertikal dan menyebabkan polutan terperangkap dekat permukaan (Amran et al., 2024).
4. Kelembapan dan Tekanan Udara
   Kelembapan dan tekanan udara digunakan untuk menggambarkan kondisi termodinamika atmosfer yang mempengaruhi karakteristik fisik massa udara. Meskipun pengaruh langsungnya terhadap dispersi CO_2 relatif lebih kecil dibanding angin dan stabilitas atmosfer, kedua parameter ini tetap menjadi bagian dari data meteorologi yang digunakan dalam proses pengolahan meteorologi AERMOD untuk merepresentasikan kondisi atmosfer secara lebih realistis (Zelinski et al., 2018).
5. Radiasi Matahari
   Radiasi matahari merupakan parameter penting dalam penentuan stabilitas atmosfer. Radiasi yang tinggi meningkatkan pemanasan permukaan dan menghasilkan turbulensi termal yang lebih kuat, sehingga proses pencampuran polutan di atmosfer menjadi lebih

efektif. Sebaliknya, radiasi rendah cenderung menghasilkan atmosfer yang lebih stabil dan dispersi polutan yang lebih terbatas (Assegaf, 2018).

6. Tutupan Awan
   Tutupan awan mempengaruhi jumlah radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi. Kondisi langit cerah umumnya menghasilkan pemanasan permukaan yang lebih besar dan turbulensi yang lebih tinggi, sedangkan tutupan awan yang tebal dapat mengurangi pemanasan permukaan dan menurunkan intensitas turbulensi atmosfer. Oleh karena itu, data tutupan awan digunakan dalam perhitungan stabilitas atmosfer pada AERMOD (Igri et al., 2011).
7. Ketinggian atmosfer
   Ketinggian lapisan pencampuran adalah tinggi maksimum lapisan udara tempat polutan dapat bercampur secara efektif. Semakin tinggi *celling height*, semakin besar volume udara yang tersedia untuk mengencerkan polutan sehingga konsentrasi polutan di udara ambien cenderung lebih rendah. Sebaliknya, *celling height* yang rendah membatasi ruang pencampuran dan dapat meningkatkan konsentrasi polutan di dekat permukaan (Carbonell et al., 2010).

Berdasarkan data tersebut, data meteorologi tidak digunakan untuk menghitung besarnya emisi yang dihasilkan oleh sumber melainkan untuk menentukan kondisi atmosfer yang mengendalikan proses penyebaran polutan dalam model dispersi Gaussian yang diimplementasikan pada perangkat lunak AERMOD.

Pemodelan dispersi udara dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan dua variasi kondisi musim, yaitu musim kemarau dan musim penghujan. Penggunaan kedua musim tersebut bertujuan untuk mengakomodasi variasi kondisi meteorologi yang dapat memengaruhi proses transport, dispersi, dan deposisi polutan di atmosfer. Oleh karena itu, penggunaan kedua kondisi musim tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih representatif mengenai rentang konsentrasi dan pola sebaran polutan yang mungkin terjadi sepanjang tahun.



Gambar 1 Curah Hujan Rata Rata 2021-2023

Penentuan periode musim kemarau dan musim penghujan dilakukan berdasarkan analisis data curah hujan pada lokasi studi. Periode dengan nilai curah hujan terendah dipilih untuk mewakili kondisi musim kemarau, sedangkan periode dengan nilai curah hujan tertinggi dipilih untuk mewakili kondisi musim penghujan. Pendekatan ini digunakan karena curah hujan merupakan salah satu parameter klimatologi utama yang digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik musim di Indonesia dan memiliki pengaruh langsung terhadap proses dispersi serta deposisi polutan di atmosfer. Berdasarkan grafik curah hujan rata rata maka penentuan musim kemarau yang meliputi bulan Mei – Oktober dan musim hujan yang meliputi November – April.

Konsentrasi hasil pemodelan merepresentasikan kontribusi tambahan dari sumber emisi kegiatan dan dapat digunakan sebagai dasar dalam memperkirakan kondisi rona lingkungan setelah kegiatan

Submitted: **20/05/2026**; Revised: **2/06/2026**; Accepted: **10/06/2026**; Published: **30/06/2026**

berlangsung melalui penggabungan dengan data rona lingkungan eksisting. Dengan demikian, penelitian ini berfokus pada pemanfaatan pemodelan dispersi sebagai alat untuk memprediksi perubahan kondisi lingkungan terutamaakibat adanya sumber emisi dari rencana kegiatan baru..

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Beban Emisi Gas Buang

Dalam melakukan perhitungan emisi gas buang perlu menentukan konsumsi bahan bakar harian kendaraan. Konsumsi bahan bakar dihitung berdasarkan jumlah unit kendaraan, rata – rata jarak tempuh harian, serta asumsi pemakaian bahan bakar per kilometer berdasarkan beberapa referensi website penyedia truck (asumsi). Nilai konsumsi ini menjadi dasar dalam perhitungan beban emisi. Berikut perhitungan emisi gas buang kendaraan dengan bahan bakar solar.

$$Konsumsi\ bahan\ bakar\ = Jumlah\ unit\ \times rit\ \times Konsumsi\ bahan\ bakar \times Panjang\ jalan$$

$$= 100\ unit\ \times 2/hari \times 0{,}00012 \frac{liter}{m} \times 828\ m$$

$$= 19{,}872\ liter/hari$$

Hasil perhitungan konsumsi bahan bakar selanjutnya digunakan untuk memperoleh besaran beban emisi setiap parameter. Beban emisi dihitung dengan mengalikan konsumsi bahan bakar dengan faktor emisi sesuai parameter pencemar, sehingga diperoleh kontribusi emisi CO, NOx, PM, SO_2, dan PM_{10} dari aktivitas pembakaran bahan bakar kendaraan. Berikut contoh perhitungan menggunakan parameter CO dalam menentukan beban emisi:

$$E = Konsumsi\ bahan\ bakar\ \left(\frac{liter}{hari}\right) \times Faktor\ emisi\ \left(\frac{g}{liter}\right) \quad (1)$$

$$Beban\ Emisi\ (E) \qquad = Konsumsi\ bahan\ bakar \times Faktor\ emisi$$

$$= 19{,}872 \frac{liter}{hari} \times 6{,}068 \frac{g}{liter}$$

$$= 120{,}583 \frac{g}{hari}$$

$$= 0{,}00139 \frac{g}{detik}$$

Tabel 2 Rekapitulasi Beban Emisi Gas Buang

Rekapitulasi Beban Emisi				
Beban Emisi	=	konsumsi bahan bakar x faktor emisi		
Parameter	***Emission Factor* (g/l)**	**Konsumsi bahan bakar (l/hari)**	**Beban Emisi (gram/hari)**	**Beban Emisi (g/s)**
PM	1,2464	19,872	24,768	0,000287
PM_{10}	0,139		2,762	0,000032

Resuspensi Kendaraan

Perhitungan emisi resuspensi kendaraan diawali dengan menentukan data eksisting di lokasi kegiatan, yang meliputi panjang jalan, jumlah kendaraan yang beroperasi, serta jumlah ritasi kendaraan. Data tersebut digunakan untuk menghitung nilai *Vehicle Kilometer Travelled* (VKT) sebagai dasar perhitungan beban emisi resuspensi.

Diketahui data eksisting pada lokasi kegiatan sebagai berikut:

Panjang jalan = 828 m
= 0,828 km
Jumlah kendaraan = 100 unit/hari
Jumlah ritasi = 2 ritasi per unit (*loaded*)

Perhitungan:

$$VKT = Panjang\ jalan\ (km) \times \frac{(Jumlah\ kendaraan \times ritasi)}{hari} \times \frac{hari}{tahun} \quad (3)$$

$$= 0{,}828\ km \times \frac{100 \times 2}{hari} \times \frac{365\ hari}{tahun}$$

$$= 60.278{,}40\ km/tahun$$

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai VKT diperoleh dari perkalian panjang jalan dengan jumlah kendaraan, jumlah ritasi, serta jumlah hari dalam satu tahun. Nilai VKT ini selanjutnya digunakan untuk menghitung beban emisi resuspensi partikulat yang dihasilkan dari aktivitas kendaraan pada ruas jalan tersebut. Secara detail perhitungan dijelaskan sebagai berikut:

k PM2,5 = 0,15 gr/VKT
k PM10 = 0,62 gr/VKT
k PM100 = 3,23 gr/VKT
a = 0,91
b = 1,02
W *loaded* = 30 *tons*
sL = 0,1 g/m^2 (mengacu pada kondisi jalan dengan tutupan aspal berdasarkan referensi data besaran sL dari *US EPA-AP 42 Chapter 13.2.1. paved roads)*

Perhitungan Faktor Emisi:

Faktor Emisi = k x (sL)^a x (W)^b (4)

Faktor Emisi $PM_{2,5}$ saat bermuatan (*loaded*) = k x (sL)^a x (W_{loaded})^b
= 0,15 x (0,1)^{0,91} x (30)^{1,02}
= 0,592 gr/VMT

Faktor Emisi PM_{10} saat bermuatan (*loaded*) = k x (sL)^a x (W_{loaded})^b
= 0,62 x (0,1)^{0,91} x (30)^{1,02}
= 2,449 gr/VMT

Faktor Emisi = k x (sL)^a x (W)^b (4)

Faktor Emisi PM saat bermuatan (*loaded*) = k x (sL)^a x (W_{loaded})^b
= 3,23 x (0,1)^{0,91} x (30)^{1,02}
= 12,760gr/VMT

Perhitungan Laju Beban:

$$Beban\ Emisi\ \ PM = VKT\ \times EF \qquad (2)$$

Beban Emisi $PM_{2,5}$ (*loaded*) = VKT x Faktor Emisi $_{loaded}$
= 60.278,400 km/tahun x 0,592 gr/VMT
= 0,0040 kg/jam
= **0,001132687 g/s**

Beban Emisi PM_{10} (*loaded*) = VKT x Faktor Emisi $_{loaded}$
= 60.278,400 km/tahun x 2,449 gr/VMT
= 0,0168 kg/jam
= **0,004681774 g/s**

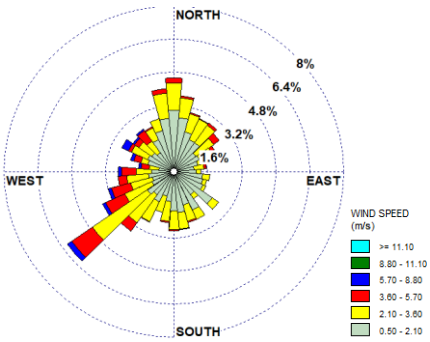
Beban Emisi PM (*loaded*) = VKT x Faktor Emisi $_{loaded}$
= 60.278,400 km/tahun x 12,760 gr/VMT
= 0,0878 kg/jam
= **0,024390534 g/s**

Submitted: **20/05/2026**; Revised: **2/06/2026**; Accepted: **10/06/2026**; Published: **30/06/2026**

Model Sebaran Emisi

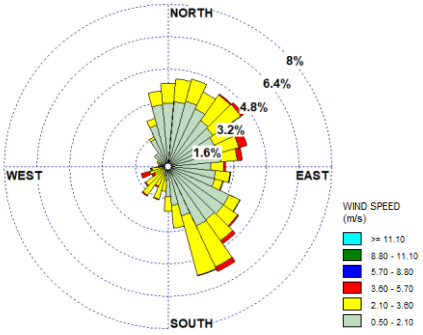
Pemodelan dilakukan untuk sumber emisi eksisting yaitu aktivitas transportasi di lokasi kegiatan dan dinyatakan sebagai sumber garis. Skenario pemodelan dilakukan pada 2 musim yaitu musim kemarau dan penghujan. Data meteorologi meliputi arah dan kecepatan angin, kelembapan, temperatur, tekanan, presipitasi, tutupan awan, radiasi matahari dan tinggi pencampuran (*mixing height*). Pemodelan dilakukan pada kondisi maksimum 24 jam untuk melihat kontribusinya pada udara ambien. Berikut merupakan hasil analisis arah angin untuk semester 1 dan 2:

Semester 1



Calms: 4,30%

Semester 2



Calms: 3,05%

Gambar 2 Model Sebaran

Arah angin pada lokasi kegiatan mobilisasi kendaraan pengangkut tidak berbeda signifikan pada musim kemarau (Mei – Oktober) maupun musim hujan (November - April). Pada musim kemarau angin bertiup dari barat daya dan utara dengan angin tenang berkisar 4,30% sedangkan pada musim hujan angin bertiup dari tenggara dan timur laut dengan angin tenang berkisar 3,05%. Kecepatan angin rata rata pada kedua musim yaitu 2,1 m/s.

Pemodelan dijalankan dalam dua skenario periode meteorologi, yaitu semester pertama (musim hujan) dan semester kedua (musim kemarau). Pembagian periode ini dimaksudkan untuk mengidentifikasi variasi *dispersion capacity* atmosfer serta membandingkan perbedaan pola sebaran emisi yang dapat dipengaruhi oleh perubahan kecepatan angin, arah angin, kelembapan, dan stabilitas atmosfer. Hasil perbandingan kedua simulasi tersebut digunakan untuk mengidentifikasi kondisi musim yang berpotensi menghasilkan konsentrasi polutan tertinggi serta menentukan sensitivitas wilayah studi terhadap variabilitas cuaca tahunan.

Sebaran Emisi Gas Buang

Subbab ini menyajikan hasil pemodelan dispersi emisi gas buang kendaraan berdasarkan nilai *emission rate* yang telah dihitung pada tahap sebelumnya. Pemodelan dilakukan menggunakan AERMOD untuk memperoleh distribusi spasial konsentrasi polutan pada area studi, baik pada kondisi musim hujan maupun musim kemarau. Perbedaan kondisi meteorologis pada kedua periode tersebut digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variabilitas atmosfer terhadap proses transportasi dan dispersi polutan. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk peta kontur konsentrasi untuk mengidentifikasi pola sebaran, lokasi dengan konsentrasi tertinggi, serta wilayah yang berpotensi menerima paparan polutan secara signifikan.

Semester 1 (Hujan)

Peak concentration = 0,562 ug/m^3

Semester 2 (Kemarau)

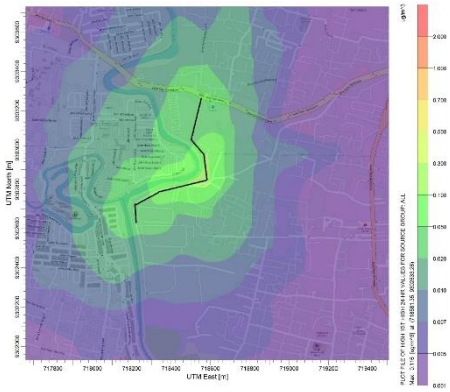
Peak concentration = 0,858 ug/m^3

Model Dispersi CO

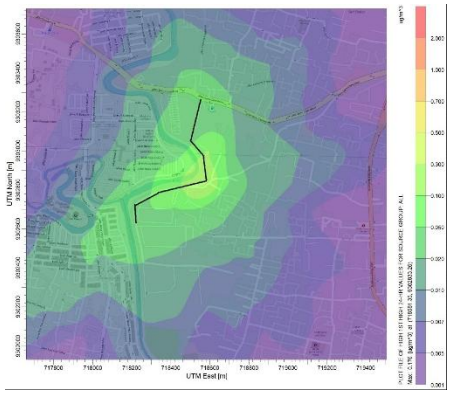
Peak concentration = 1,13 ug/m^3

Peak concentration = 1,73 ug/m^3

Model Dispersi NOx



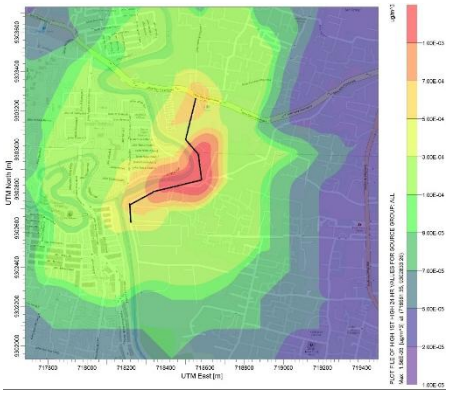
Peak concentration = 0,116 ug/m^3



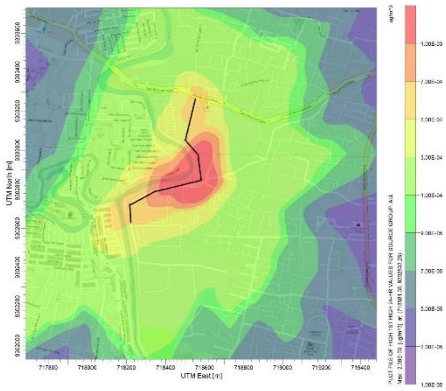
Peak concentration = 0,176 ug/m^3

Model Dispersi PM

Submitted: **20/05/2026**; Revised: **2/06/2026**; Accepted: **10/06/2026**; Published: **30/06/2026**

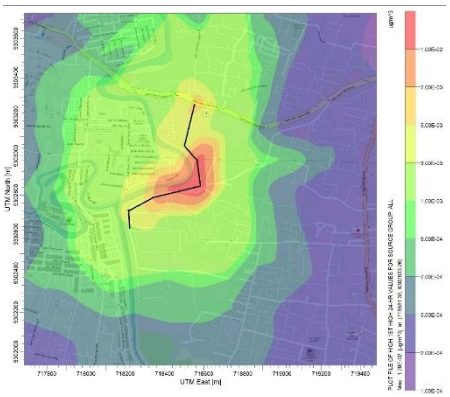


Peak concentration = 0,00156 ug/m^3

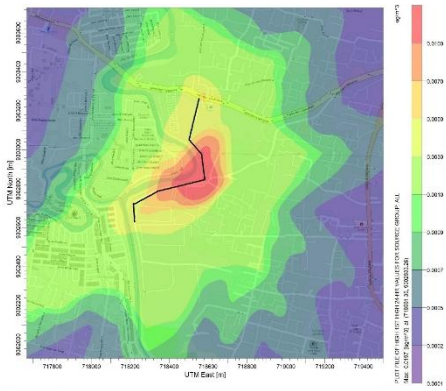


Peak concentration = 0,00239ug/m^3

Model Dispersi SOx



Peak concentration = 0,0129 ug/m^3



Peak concentration = 0,0197 ug/m^3

Gambar 3 Hasil Model Dispersi Gas Buang

Tabel 3 Rekapitulasi *Peak Concentration* Emisi Gas Buang

Rekapitulasi *Peak Concentration*		
Parameter	Semester 1 (ug/m^3)	Semester 2 (ug/m^3)
CO	0,562	0,858
NOx	1,13	1,73
PM	0,116	1,176
SOx	0,00156	0,00239
PM10	0,0129	0,0197

Sebaran Emisi Resuspensi

Pada bagian ini ditampilkan hasil pemodelan dispersi emisi resuspensi yang berasal dari aktivitas lalu lintas kendaraan. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan nilai laju emisi partikulat ($PM_{2.5}$, PM_{10}, dan TSP) sebagai *input* utama sehingga diperoleh representasi sebaran spasial yang sesuai dengan kondisi lapangan. Sama seperti pemodelan emisi gas buang, simulasi dilakukan dalam dua skenario periode, yaitu musim hujan dan musim kemarau, guna menilai sensitivitas konsentrasi polutan terhadap kondisi meteorologi. *Output* pemodelan divisualisasikan dalam bentuk peta kontur untuk menunjukkan area akumulasi emisi, arah transportasi polutan, serta *hotspot* yang berpotensi menimbulkan dampak bagi lingkungan sekitar.

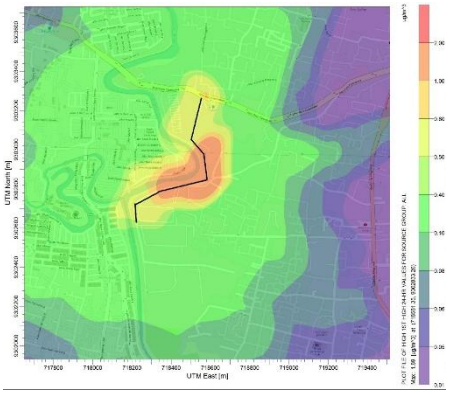
Semester 1 (Hujan)

Peak concentration : 0,457 ug/m^3

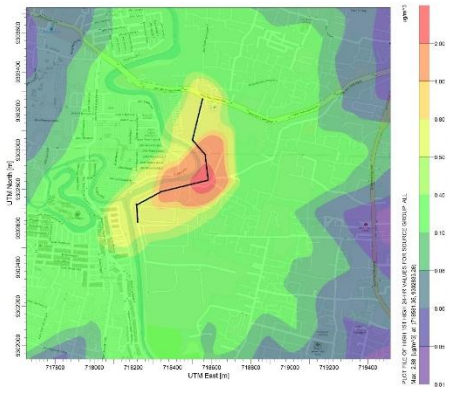
Semester 2 (Kemarau)

Peak concentration : 0,697 ug/m^3

Hasil Model Resuspensi $PM_{2,5}$

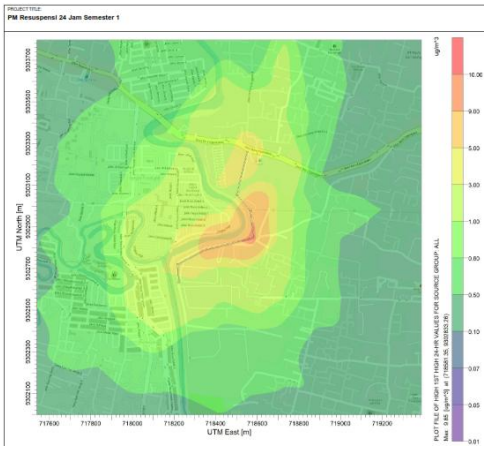


Peak concentration : 1,89 ug/m^3

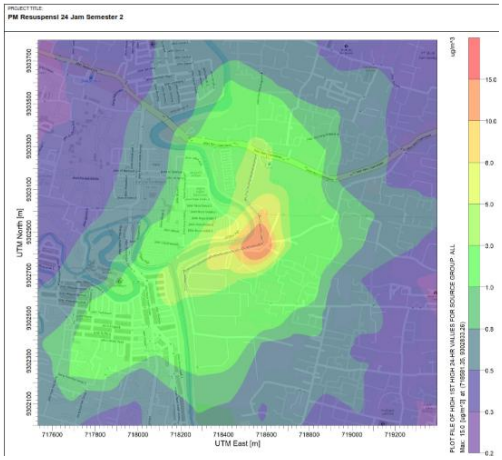


Peak concentration : 2,88 ug/m^3

Hasil Model Resuspensi PM_{10}



Peak concentration : 9,85 ug/m^3



Peak concentration : 15 ug/m^3

Gambar 4 Model Dispersi Emisi Resuspensi

Submitted: **20/05/2026**; Revised: **2/06/2026**; Accepted: **10/06/2026**; Published: **30/06/2026**

Tabel 4 Rekapitulasi *Peak Concentration* Emisi Resuspensi

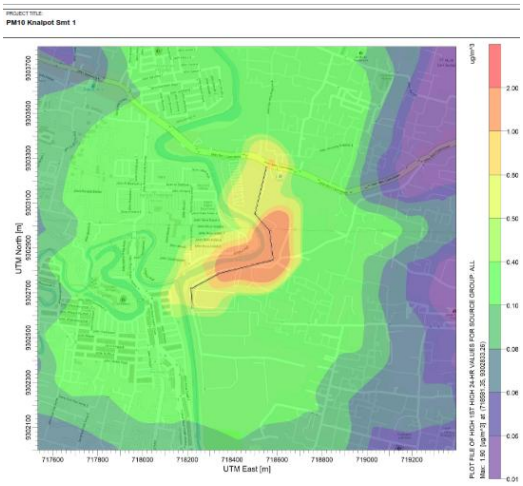
Rekapitulasi *Peak Concentration*		
Parameter	Semester 1 (ug/m^3)	Semester 2 (ug/m^3)
$PM_{2,5}$	0,457	0,697
PM_{10}	1,89	2,88
PM	9,85	15

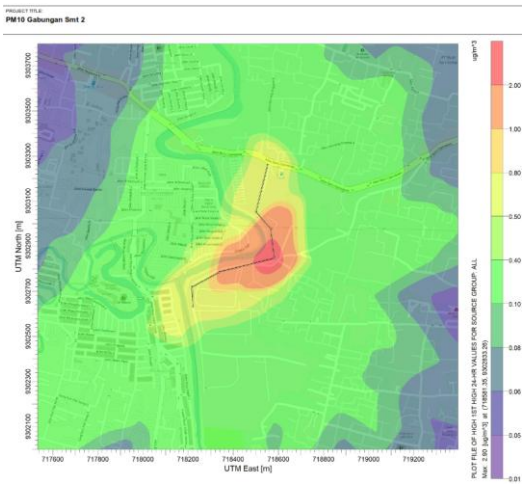
Berdasarkan hasil pemodelan, terlihat bahwa konsentrasi puncak (*peak concentration*) emisi resuspensi cenderung lebih tinggi pada musim kemarau dibandingkan musim hujan. Hal ini dipengaruhi oleh kondisi atmosfer dan kelembaban udara yang lebih rendah pada musim kemarau, sehingga partikel lebih mudah terdispersi ke udara. Dengan demikian, emisi resuspensi dari aktivitas kendaraan memberikan kontribusi signifikan terhadap kualitas udara di sekitar lokasi kegiatan.

Sebaran Emisi Partikulat dan Resuspensi Kendaraan

Untuk parameter partikulat (PM dan PM_{10}), pemodelan dilakukan dengan mempertimbangkan kontribusi total dari kedua sumber tersebut (gas buang dan resuspensi), sehingga estimasi konsentrasi yang diperoleh mencerminkan beban emisi aktual pada lokasi studi. Hasil pemodelan dispersi gabungan antara emisi partikulat dari pembakaran bahan bakar dan resuspensi kendaraan ditunjukkan pada Gambar berikut. Pemodelan dilakukan menggunakan nilai *emission rate* hasil perhitungan pada sub bab sebelumnya sebagai data *input*, sehingga diperoleh gambaran distribusi konsentrasi $PM_{2.5}$ dan PM_{10} pada kondisi musim hujan dan musim kemarau.

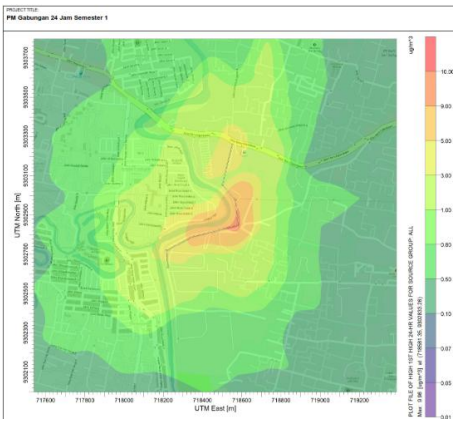
Semester 1 (Hujan) **Semester 2 (Kemarau)**

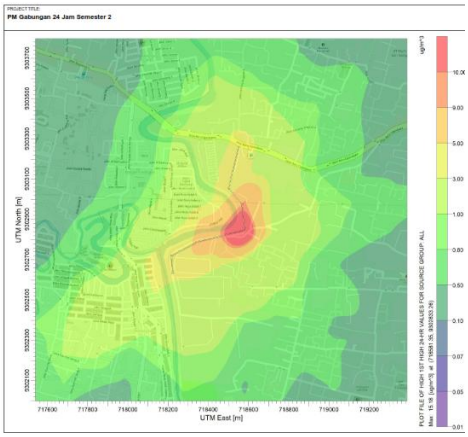




Peak concentration = 1,90 ug/m^3 *Peak concentration* = 2,9 ug/m^3

Model Dispersi PM_{10}





Peak concentration = 9,96 ug/m^3 *Peak concentration* = 15,18 ug/m^3

Gambar 5 Model Dispersi Emisi Partikulat dan Resuspensi Kendaraan

Berikut tabel rekapitulasi nilai *peak concentration* $PM_{2.5}$ dan PM_{10} pada semester 1 (musim hujan) dan semester 2 (musim kemarau).

Tabel 5 Rekapitulasi Peak Concentration Emisi Partikulat dan Resuspensi Kendaraan

Rekapitulasi *Peak Concentration*		
Parameter	Semester 1 (ug/m^3)	Semester 2 (ug/m^3)
PM Gabungan	1,90	2,9
PM_{10} Gabungan	9,96	15,18

Analisis Hasil Sebaran Emisi Gas Buang dan Resuspensi

Berdasarkan hasil pemodelan dispersi, terlihat adanya variasi konsentrasi polutan baik secara spasial maupun temporal yang dipengaruhi oleh interaksi kompleks sumber pencemar, kondisi meteorologi dan sifat fisik – kimia partikulat. Konsentrasi tertinggi cenderung berada pada area yang berdekatan dengan sumber emisi, yaitu ruas jalan tempat aktivitas lalu lintas terjadi. Pola gradien konsentrasi menunjukkan bahwa nilai konsentrasi menurun seiring meningkatnya jarak dari sumber, yang sesuai dengan karakteristik model dispersi *Gaussian* berbasis sumber garis. Hal ini mengindikasikan bahwa paparan terbesar terjadi pada zona pertama di sekitar jalur lalu lintas.

Submitted: **20/05/2026**; Revised: **2/06/2026**; Accepted: **10/06/2026**; Published: **30/06/2026**

Perbandingan antara kondisi meteorologis musim hujan dan musim kemarau menunjukkan bahwa konsentrasi polutan pada umumnya lebih tinggi pada musim kemarau. Kondisi ini dipengaruhi oleh kecepatan angin yang relatif lebih tinggi dan tingkat kelembapan yang lebih rendah, sehingga memungkinkan partikel tersuspensi bertahan lebih lama di udara dan mengalami transportasi lebih jauh. Selain itu permukaan jalan yang kering semakin meningkatkan laju resuspensi partikel halus akibat gaya gesek dari kendaraan. Kondisi berbeda ditunjukkan pada musim hujan, proses deposisi basah berkontribusi pada penurunan konsentrasi partikulat di udara.

Jika dibandingkan berdasarkan sumbernya, emisi yang bersumber dari resuspensi kendaraan memberikan kontribusi lebih signifikan terhadap konsentrasi partikulat dibandingkan dengan emisi gas buang kendaraan. Konsentrasi partikulat semakin meningkat terutama pada volume kendaraan tinggi dan permukaan jalan yang kasar. Fenomena ini semakin terlihat pada musim kemarau, ketika permukaan jalan cenderung lebih kering dan aktivitas resuspensi meningkat akibat pergerakan kendaraan. Resuspensi debu jalanan dapat menyumbang 30-60% konsentrasi partikulat pada kondisi kering (Obeid et al., 2024).

Temuan ini menunjukkan bahwa model dispersi udara berperan penting dalam analisis pencemaran udara berbasis transportasi karena mampu mengintegrasikan faktor sumber, kondisi meteorologi, dan karakteristik lingkungan dalam satu sistem evaluasi. Dengan pemodelan tersebut, prediksi dampak lingkungan dapat dilakukan secara terukur, sehingga mendukung perencanaan kebijakan pengendalian pencemaran udara yang lebih tepat sasaran.

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil pemodelan dispersi menunjukkan bahwa emisi dari aktivitas transportasi, baik yang berasal dari gas buang maupun resuspensi, memiliki pola sebaran yang terkonsentrasi di sekitar jalur lalu lintas dan menurun seiring bertambahnya jarak dari sumber. Variasi musim berpengaruh terhadap besaran konsentrasi, di mana musim kemarau cenderung menghasilkan nilai yang lebih tinggi dibanding musim hujan akibat kondisi atmosfer yang lebih kering dan mendukung terjadinya resuspensi. Selain itu, kontribusi resuspensi terlihat lebih dominan untuk parameter partikulat dibandingkan dengan emisi gas buang, sehingga menunjukkan bahwa aktivitas pergerakan kendaraan tidak hanya berpengaruh melalui pembakaran bahan bakar, tetapi juga melalui pergerakan debu jalan yang terangkat kembali ke udara. Secara keseluruhan, penggunaan pemodelan dispersi udara terbukti mampu memberikan gambaran spasial yang jelas mengenai perilaku emisi transportasi di lingkungan sekitar. Penelitian ini masih memodelkan dampak emisi berdasarkan skenario rencana kegiatan, sehingga penelitian selanjutnya disarankan untuk memasukkan pemodelan kondisi eksisting lalu lintas agar dapat dilakukan analisis perbandingan dan memperoleh gambaran yang lebih utuh mengenai perubahan beban emisi sebelum dan sesudah kegiatan berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

Amran, Wahyuni, Sibali, A., Mahyuni, E. T., Menne, F., Malik, & Wardana, M. A. (2024). *ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF AIR POLLUTANTS USING THE AERMET METEOROLOGICAL MODEL AND THE GAUSSIAN DISPERSION MODEL*. *1*(7), 13–24.

Assegaf, A. H. (2018). *PEMODELAN DISPERSI GAS DARI CEROBONG PLTU DENGAN MODEL PASQUIL-GAUSSIAN*. *8*(3), 414–419. https://doi.org/10.29244/jpsl.8.3.414-419

Carbonell, L. M. T., Gacita, M. S., Oliva, J. de J. R., Garea, L. C., Rivero, N. D., & Ruiz, E. M. (2010). Methodological guide for implementation of the AERMOD system with incomplete local data. *Atmospheric Pollution Research*, *1*(2), 102–111. https://doi.org/10.5094/APR.2010.013

Einstein, A. (2010). *Principles of Environmental Modeling*. 37–61. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8608-2

EPA, U. (2011). *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors from Stationary Sources*.

Fussell, J. C., Franklin, M., Green, D. C., Gustafsson, M., Harrison, R. M., Hicks, W., Kelly, F. J., Kishta, F., Miller, M. R., Mudway, I. S., Oroumiyeh, F., Selley, L., Wang, M., & Zhu, Y. (2022). *Edinburgh Research Explorer A Review of Road Traffic-Derived Non-Exhaust Particles : Emissions , Physicochemical Characteristics , Health Risks , and Mitigation Measures A Review of Road Tra ffi c-Derived Non-Exhaust Particles : Emissions , Physicochemica*. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c01072

Grigoratos, T., & Martini, G. (2017). *Brake wear particle emissions : a review Brake wear particle emissions : a review*. *September*. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8

Igri, P. M., Vondou, D. A., & Kamga, F. M. (2011). *Case Study of Pollutants Concentration Sensitivity to Meteorological Fields and Land Use Parameters over Douala (Cameroon) Using AERMOD Dispersion Model*. 715–741. https://doi.org/10.3390/atmos2040715

Khan, K., Pan, W., Liu, T., Huang, J., Huang, P., & Kuo, H. (2026). *Association of PM 2 . 5 and PM 10 exposure with respiratory and cardiovascular diseases among residents near a power plant in Taiwan*.

KLH. (2007). *Kualitas Udara*.

M. Taffarel Faridzi Naufal, Munfarida, I., & Yusriani. (2023). *Dampak : Jurnal Teknik Lingkungan Universitas Andalas Analisis Karbon Monoksida (CO) Menggunakan Metode Gaussian Plume di Persimpangan Margorejo Ahmad Yani Surabaya*. *1*, 16–25.

Obeid, B., Muresan-paslaru, B., & Murzyn, F. (2024). Factors influencing particle resuspension and dispersion : An experimental study using test-track measurements. *Transportation Research Part D*, *134*(June), 104321. https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104321

Purnomoasri, R. A. D., & Handayani, D. (2022). *Analisis dan Mitigasi Emisi Gas Buang Akibat Transportasi (Studi Kasus Kabupaten Magetan)*. *24*, 29–36.

Zelinski, J., Kaleta, D., & Telenga-kopyczynska, J. (2018). *Inclusion of Increased Air Turbulence Caused by Coke Production into Atmospheric Propagation Modelling*. *8*, 803–813. https://doi.org/10.1007/s41742-018-0133-8

Submitted: **20/05/2026**; Revised: **2/06/2026**; Accepted: **10/06/2026**; Published: **30/06/2026**