Kontribusi emisi transportasi jalan terhadap beban lingkungan perkotaan di sekitar kawasan Kampus 1 UIN Maulana Malik Ibrahim Malang

Rona Rofida*, Lusi Ulisfah, Raynita Monica Sridevi, Muhammad Alif Arifin
Program Studi Teknik Lingkungan, UIN Maulana Malik Ibrahim Malang
*Email: ronarofida@uin-malang.ac.id

Received 18 Mei 2026; Received in revised 17 Juni 2026; Accepted 26 Juni 2026

Abstrak

Transportasi jalan merupakan salah satu sumber utama pencemaran udara di kawasan perkotaan, termasuk pada kawasan sekitar institut pendidikan yang terintegrasi dengan sistem transportasi kota. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kontribusi emisi karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), dan sulfur oksida (SO_x) dari aktivitas transportasi jalan terhadap beban lingkungan perkotaan di sekitar kampus 1 UIN Maulana Malik Ibrahim Malang. Data diperoleh melalui survei *traffic counting* pada periode *weekday* dan *weekend,* dihitung menggunakan pendekatan beban emisi dan dikonversi menjadi konsentrasi beban emisi berdasarkan jumlah kendaraan, panjang ruas jalan, dan faktor emisi. Hasil menunjukkan konsentrasi CO tertinggi terjadi pada *weekday* pagi sebesar 76.045,56 µg/m^3, NO_x tertinggi pada *weekend* sore sebesar 5.654,95 µg/m^3, dan SO_x tertinggi pada *weekend* sore sebesar 398,79 µg/m^3. Konsentrasi CO dan NO_x pada seluruh periode pengamatan melampaui baku mutu udara ambien berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021, sedangkan SO_x melampaui baku mutu pada periode *weekday* pagi dan *weekend* sore. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa transportasi jalan memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan beban pencemaran udara dan kualitas udara ambien di kawasan kampus sebagai bagian dari sistem perkotaan. Oleh karena itu, diperlukan strategi pengendalian emisi untuk mendukung pengelolaan kualitas udara yang berkelanjutan.

Kata kunci: beban emisi, kualitas udara ambien, transportasi jalan

Abstract

Road transportation is one of the major sources of air pollution in urban areas, including regions surrounding educational institutions integrated within urban transportation systems. This study aims to analyze the contribution of carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), and sulfur oxides (SO_x) emissions from road transportation activities to the urban environmental pollution burden around Campus 1 of Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang. Data were collected through traffic counting surveys conducted during weekday and weekend periods. Emission loads were estimated using an emission load approach and converted into emission concentration levels based on traffic volume, road length, and emission factors. The results showed that the highest CO concentration occurred during the weekday morning period at 76,045.56 µg/m^3, while the highest NO_x and SO_x concentrations were observed during the weekend afternoon period at 5,654.95 µg/m^3 and 398.79 µg/m^3, respectively. CO and NOx concentrations exceeded the ambient air quality standards stipulated in Government Regulation No. 22 of 2021 during all observation periods, whereas SO_x concentrations exceeded the standard limits during the weekday morning and weekend afternoon periods. These findings indicate that road transportation activities significantly contribute to increased air pollution loads and affect ambient air quality in campus areas as part of the urban environmental system. Therefore, emission control strategies are required to support sustainable urban air quality management.

Keywords: *ambient air quality; emission load; road transportation*

1. PENDAHULUAN

Transportasi jalan merupakan salah satu penyebab utama pencemaran udara di wilayah perkotaan yang berasal dari emisi gas buang kendaraan bermotor. Peningkatan jumlah kendaraan dan intensitas aktivitas perkotaan menyebabkan kenaikan konsentrasi pencemar udara secara signifikan. Secara global, sektor transportasi merupakan kontributor utama terhadap emisi polutan seperti karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), dan sulfur dioksida (SO_x), yang berdampak terhadap kualitas udara ambien dan kesehatan manusia (Seinfeld dan Pandis, 2016; European Environment Agency, 2022). Di negara berkembang, kontribusi transportasi terhadap pencemaran udara dapat mencapai 70–80% akibat pertumbuhan kendaraan yang pesat dan lemahnya pengendalian emisi (World Health Organization (WHO), 2021).

Berbagai penelitian telah mengkaji inventarisasi emisi transportasi dan dampaknya terhadap kualitas udara pada skala kota dan metropolitan (Anggraeni dan Handriyono, 2024; Kusuma *et al*., 2023; Niam *et al*., 2021). Studi oleh Zhang *et al*. (2012) menunjukkan bahwa pengendalian emisi transportasi menjadi kunci dalam perbaikan kualitas udara perkotaan. Selain itu, pendekatan inventarisasi emisi berbasis aktivitas kendaraan dan faktor emisi telah menjadi metode standar dalam berbagai studi global untuk mengevaluasi kontribusi sektor transportasi terhadap pencemaran udara (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2019). Penelitian lain juga menunjukkan bahwa distribusi emisi transportasi sangat dipengaruhi oleh variasi spasial dan temporal, termasuk pola lalu lintas harian dan kepadatan kendaraan (Gately *et al*., 2017).

Di Indonesia, penelitian terkait inventarisasi emisi transportasi umumnya dilakukan pada skala kota atau koridor jalan utama. Misalnya, studi di Jalan Keude Cunda, Kota Lhokseumawe, mengestimasi beban emisi berdasarkan volume kendaraan dan faktor emisi (Ersa *et al*., 2023), sementara inventarisasi emisi di Kota Pontianak menekankan pentingnya pengelolaan emisi kendaraan dalam menjaga kualitas udara perkotaan (Rahmasari *et al*., 2023). Meskipun memberikan kontribusi penting, sebagian besar penelitian tersebut masih bersifat makro dan belum secara spesifik membahas pola perubahan emisi pada skala kawasan dengan karakteristik aktivitas yang lebih kompleks.

Dalam konteks ini, kawasan kampus dapat dipandang sebagai kawasan dengan kompleksitas aktivitas yang tinggi dan pola mobilitas yang khas. Lingkungan kampus merupakan area semi tertutup dengan interaksi antara lalu lintas internal dan eksternal,

sehingga memiliki karakteristik emisi yang berbeda dibandingkan dengan jaringan jalan perkotaan secara umum. Berbagai studi menunjukkan bahwa lingkungan dengan aktivitas transportasi yang intensif mengalami variasi konsentrasi polutan yang signifikan, yang dipengaruhi oleh volume kendaraan dan dinamika lalu lintas, terutama selama periode jam sibuk (Kaur *et al*., 2007; Karner *et al*., 2010; Bigazzi dan Figliozzi, 2014). Selain itu, studi pada lingkungan kampus menunjukkan bahwa konsentrasi polutan memiliki variasi spasial dan temporal yang signifikan, dipengaruhi oleh aktivitas transportasi internal, kepadatan pengguna, serta pola operasional harian kawasan (Sharma *et al*., 2013; Baldauf *et al*., 2008).

Namun demikian, kajian yang secara khusus mengkaji kontribusi emisi transportasi pada kawasan kampus masih relatif terbatas, terutama dalam konteks negara berkembang. Selain itu, sebagian besar penelitian belum mengintegrasikan analisis variasi temporal antara hari kerja (*weekday*) dan akhir pekan (*weekend*), padahal perbedaan aktivitas tersebut dapat menghasilkan variasi emisi yang signifikan (Gately *et al*., 2017). Di sisi lain, keterkaitan antara hasil inventarisasi emisi dengan implikasi kebijakan transportasi berkelanjutan di tingkat kawasan juga masih jarang dibahas secara komprehensif (WHO, 2021). Hal ini menyebabkan kurang optimalnya integrasi hasil inventarisasi emisi dengan rekomendasi kebijakan transportasi berkelanjutan di tingkat lokal.

Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan kebaruan dengan mengkaji kontribusi emisi transportasi jalan di kawasan Kampus 1 UIN Maulana Malik Ibrahim Malang menggunakan pendekatan analisis temporal berbasis variasi waktu operasional, serta pengelompokan berdasarkan jenis kendaraan. Penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk menghitung besaran emisi CO, NO_x, dan SO_x, tetapi juga memberikan dasar ilmiah dalam mendukung pengembangan kebijakan transportasi kampus yang berkelanjutan.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Lokasi dan waktu penelitian

Penelitian ini dilakukan di ruas Jalan Gajayana No. 50 kampus 1 UIN Maulana Malik Ibrahim Malang, dengan panjang jalan yang diamati adalah 1 kilometer (km). Pemilihan lokasi ini didasarkan pada karakteristiknya sebagai koridor dengan tingkat kepadatan lalu lintas yang tinggi, terutama pada jam sibuk, yang secara signifikan berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi polutan udara di sekitar jalan (Karner *et al*., 2010; Baldauf *et al*., 2008). Selain itu, ruas Jalan Gajayana memiliki intensitas pergerakan kendaraan yang dinamis, baik dari sivitas

akademika maupun masyarakat umum, sehingga menjadikannya representatif untuk menggambarkan aktivitas transportasi di lingkungan kampus dan sekitarnya. Pengambilan data dilakukan selama satu minggu yang mencakup *weekday* dan *weekend* pada jam puncak pagi (07.00-08.00) dan sore (15.00-16.00) WIB.

2.2 Alat dan bahan

Penelitian ini menggunakan alat penghitung jumlah kendaraan (*traffic counter*), *stopwatch*, dan kamera/ponsel untuk dokumentasi, serta perangkat lunak *Microsoft Excel* untuk pengolahan dan analisis data. Data yang dibutuhkan meliputi data panjang dan luas jalan, kecepatan angin, serta jumlah kendaraan berdasarkan jenisnya (sepeda motor, mobil bensin, mobil solar, bus, dan truk).

2.3 Metode

Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, pengumpulan data dilakukan melalui survei inventarisasi ruas jalan dan survei *traffic counting*. Metode tersebut dilakukan secara langsung di dua titik lokasi pada jam 07.00 dan jam 15.00 WIB selama satu jam untuk mencatat jumlah kendaraan yang melintas pada ruas jalan yang diteliti. Selain itu, data inventarisasi jalan yang didapatkan mencakup panjang ruas jalan, lebar jalan, tinggi bangunan sekitar, dan kecepatan angin.

Analisis Data

Analisis nilai emisi kendaraan dilakukan untuk mengetahui jumlah emisi yang dihasilkan oleh tiap kendaraan bermotor. Tiap jenis kendaraan memiliki nilai emisi yang berbeda-beda menurut dengan jenis bahan bakar yang digunakan. Nilai emisi dapat diketahui dengan perhitungan melalui beberapa variabel yaitu, jumlah kendaraan yang melintas selama satu jam, panjang ruas jalan yang diamati (km), dan faktor emisi CO (g/km), NO_x (g/km), serta SO_x (g/km) dari setiap jenis kendaraan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Jumlah kendaraan bermotor

Berdasarkan hasil survei, jumlah kendaraan bermotor di sekitar Kampus 1 UIN Maulana Malik Ibrahim Malang didominasi oleh sepeda motor pada seluruh waktu pengamatan.

Tabel 1. Jumlah kendaraan bermotor

Jenis Kendaraan	*Weekday* Pagi	*Weekday* Sore	*Weekend* Pagi	*Weekend* Sore
Motor	5035	4915	3402	4266
Mobil bensin	622	433	622	580
Mobil solar	192	191	192	828
Bis	11	10	11	11
Truck	49	52	28	96
Total	5909	5601	4255	5781

Jumlah kendaraan pada hari kerja (*weekday*) cenderung lebih tinggi dibandingkan pada akhir pekan (*weekend*). Namun, pada *weekend* sore hari masih tercatat jumlah kendaraan yang relatif tinggi, menunjukkan bahwa aktivitas lalu lintas di kawasan kampus tidak hanya dipengaruhi oleh kegiatan di kampus, tetapi juga oleh aktivitas perkotaan lainnya.

3.2 Perhitungan beban emisi

Beban emisi kendaraan dihitung berdasarkan data hasil survei lalu lintas, panjang ruas jalan yang diamati, serta faktor emisi yang mengacu pada jenis kendaraan. Perhitungan beban emisi dilakukan menggunakan Persamaan (1):

$$Emisi = n \times L \times EF \quad (1)$$

Dimana:

E = beban emisi (g/jam)

n = jumlah kendaraan setiap jenis kendaraan yang melintas dalam waktu 1 jam (kendaraan/jam)

L = panjang ruas jalan (km)

EF = faktor emisi gas pencemar berdasarkan jenis kendaraan (g/km/kendaraan)

Tabel 2. Faktor emisi kendaraan bermotor

Jenis Kendaraan	CO (g/km)	NO_x (g/km)	SO_x (g/km)
Motor	14	0,29	0,008
Mobil bensin	40	2	0,026
Mobil solar	2,8	3,5	0,44
Bis	11	11,9	0,9
Truk	8,4	17,7	0,82

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010

Adapun perhitungan konsentrasi beban emisi dilakukan untuk menggambarkan besarnya kadar gas pencemar yang terdispersi dan potensi gas pencemar. Untuk mengestimasi konsentrasi polutan di udara ambien, digunakan pendekatan model dispersi sederhana

berbasis keseimbangan massa (*box model*), yang mengasumsikan bahwa polutan terdistribusi secara homogen dalam volume udara tertentu pada ruas jalan yang diamati. Model ini dipilih karena:

1. Sederhana dan sesuai untuk skala mikro (ruas jalan/kampus).
2. Membutuhkan data yang relatif terbatas dibandingkan model dispersi kompleks (misalnya AERMOD atau CALINE).
3. Telah banyak digunakan dalam studi pendahuluan untuk mengestimasi konsentrasi polutan lalu lintas.

Model ini dinyatakan dalam Persamaan (2):

$$C = \frac{E}{U \times H \times W} \quad (2)$$

Dimana:

C = konsentrasi gas polutan ($\mu g/m^3$)

E = beban emisi (g/s)

U = kecepatan angin (m/s)

H = tinggi bangunan sekitar (m)

W = lebar ruas jalan (m)

Perhitungan konsentrasi polutan dalam penelitian ini menggunakan beberapa asumsi sebagai berikut:

1. Polutan terdispersi secara merata dalam volume udara (*steady-state condition*).
2. Kondisi meteorologi dianggap konstan selama periode pengamatan.
3. Kecepatan angin rata-rata menggunakan 2 m/s sesuai hasil pengamatan.
4. Tinggi pencampuran mengikuti tinggi bangunan sekitar yakni 25 m.

Pendekatan ini mengacu pada model dispersi sederhana yang umum digunakan dalam studi awal kualitas udara perkotaan, khususnya pada lingkungan jalan.

3.3 Analisis nilai emisi transportasi jalan

Tabel 3 dan 4 menunjukkan hasil perhitungan beban emisi dan konsentrasi gas CO dari aktivitas transportasi jalan di sekitar kampus 1 UIN Maulana Malik Ibrahim Malang berdasarkan jenis kendaraan dan periode waktu pengamatan. Pada parameter CO, konsentrasi tertinggi terjadi pada *weekday* pagi sebesar 76.045,56 µg/m^3, yang menunjukkan hampir delapan kali lipat dari baku mutu emisi CO (10.000 µg/m^3). Tingginya emisi CO ini didominasi oleh sepeda motor yang mencapai lebih dari 80% total kendaraan. Secara ilmiah, CO merupakan produk dari pembakaran tidak sempurna bahan bakar bensin, yang umumnya

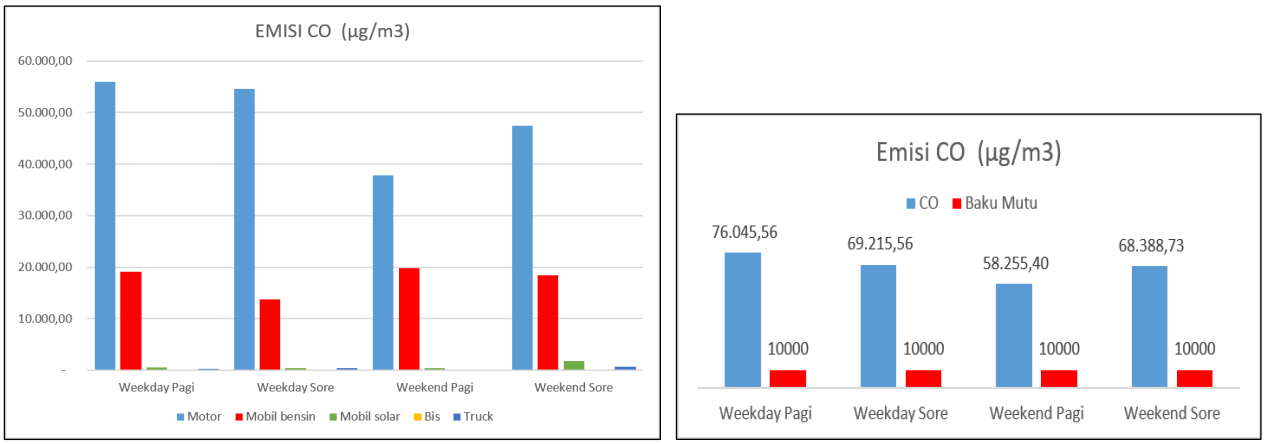
terjadi pada kendaraan ringan terutama dalam kondisi lalu lintas padat dan akselerasi berulang (Heywood, 2018). Studi oleh Zhang dan Batterman (2013) menunjukkan bahwa kendaraan ringan, khususnya sepeda motor, merupakan kontributor utama emisi CO di kawasan perkotaan dengan kepadatan lalu lintas tinggi.

Tabel 3. Konsentrasi emisi gas CO

	Emisi CO (µg/m3)			
Jenis Kendaraan	*Weekday* Pagi	*Weekday* Sore	*Weekend* Pagi	*Weekend* Sore
Motor	55.944,44	54.611,11	37.800,00	47.400,00
Mobil bensin	19.142,86	13.746,03	19.746,03	18.412,70
Mobil solar	535,56	424,44	426,67	1.840,00
Bis	96,03	87,30	96,03	96,03
Truk	326,67	346,67	186,67	640,00
Total	76.045,56	69.215,56	58.255,40	68.388,73

Tabel 4. Perbandingan emisi CO terhadap baku mutu

Parameter	*Weekday* Pagi	*Weekday* Sore	*Weekend* Pagi	*Weekend* Sore
CO	76.045,56	69.215,56	58.255,40	68.388,73
Baku Mutu	10000	10000	10000	10000



(a) (b)

Gambar 1. (a) Konsentrasi emisi CO; (b) Perbandingan konsentrasi emisi CO terhadap baku mutu

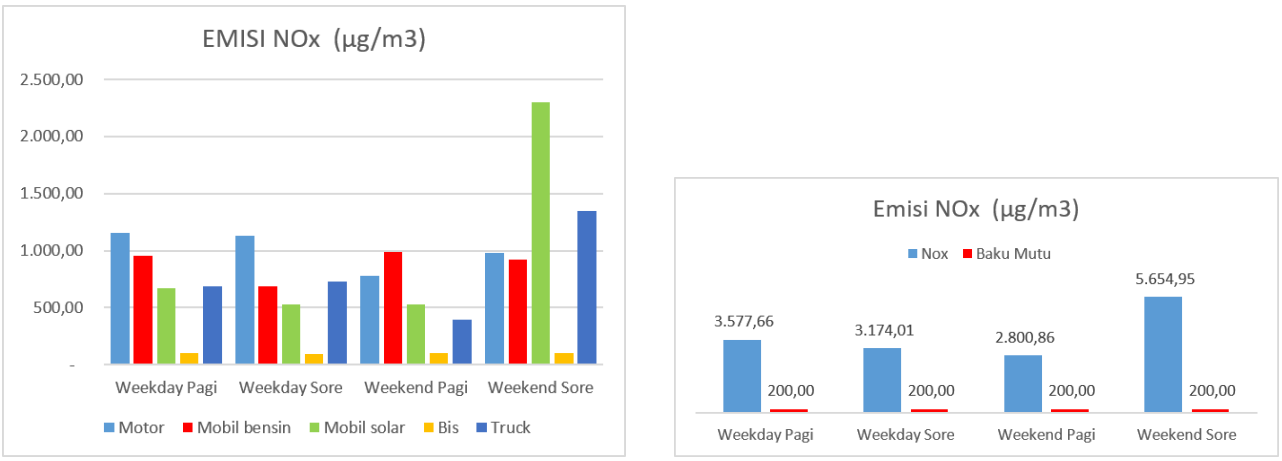
Konsentrasi polutan yang melebihi baku mutu memiliki implikasi serius terhadap kesehatan civitas akademika serta kualitas lingkungan kampus sebagai ruang belajar. Paparan CO dapat menyebabkan gangguan sistem kardiovaskular dan penurunan kapasitas oksigen dalam darah, karena gas ini memiliki afinitas tinggi terhadap hemoglobin (WHO, 2021). Dalam konteks kampus, kondisi ini berpotensi menurunkan konsentrasi belajar dan produktivitas mahasiswa.

Tabel 5. Konsentrasi emisi NO_x

Emisi NOx (µg/m3)				
Jenis Kendaraan	*Weekday* Pagi	*Weekday* Sore	*Weekend* Pagi	*Weekend* Sore
Motor	1.158,85	1.131,23	783,00	981,86
Mobil bensin	957,14	687,30	987,30	920,63
Mobil solar	669,44	530,56	533,33	2.300,00
Bis	103,89	94,44	103,89	103,89
Truk	688,33	730,48	393,33	1.348,57
Total	3.577,66	3.174,01	2.800,86	5.654,95

Tabel 6. Perbandingan konsentrasi emisi NO_x terhadap baku mutu

Parameter	*Weekday* Pagi	*Weekday* Sore	*Weekend* Pagi	*Weekend* Sore
NO_x	3.577,66	3.174,01	2.800,86	5.654,95
Baku Mutu	200	200	200	200



(a) (b)

Gambar 2. (a) Konsentrasi emisi NO_x; (b) Perbandingan konsentrasi emisi NO_x terhadap baku mutu

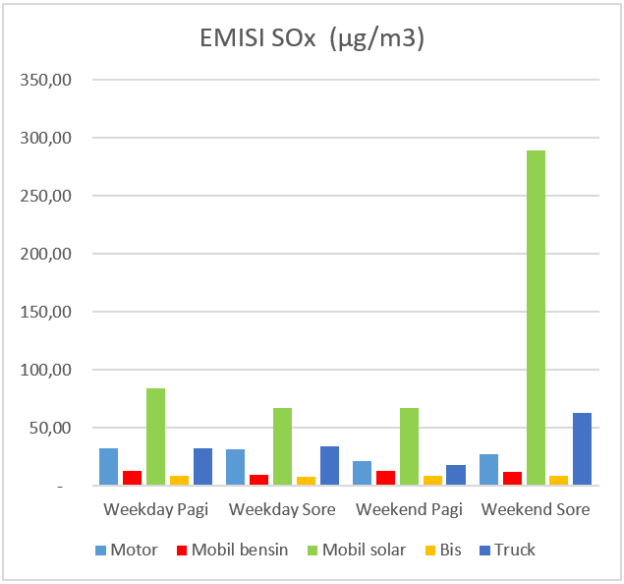
Sementara itu, konsentrasi NO_x tertinggi terjadi pada periode *weekend* sore sebesar 5.654,95 µg/m^3, jauh melampaui baku mutu. Emisi NO_x dihasilkan dari reaksi nitrogen dan oksigen pada suhu pembakaran tinggi, yang umumnya terjadi pada mesin diesel (Turns, 2012). Kontribusi kendaraan berbahan bakar solar seperti truk dan bus dalam penelitian ini memperkuat temuan tersebut. Hal ini konsisten dengan temuan bahwa kendaraan diesel, khususnya kendaraan berat, merupakan salah satu sumber utama emisi NO_x di kawasan perkotaan dan berkontribusi signifikan terhadap pencemaran udara lalu lintas (Zhang dan Batterman, 2013; Sharma *et al*., 2020).

Tabel 7. Konsentrasi emisi gas SO_x

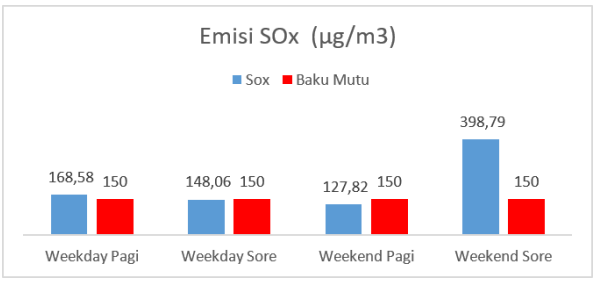
	Emisi SOx (µg/m3)			
Jenis Kendaraan	*Weekday* Pagi	*Weekday* Sore	*Weekend* Pagi	*Weekend* Sore
Motor	31,97	31,21	21,60	27,09
Mobil bensin	12,44	8,93	12,83	11,97
Mobil solar	84,16	66,70	67,05	289,14
Bis	8,12	7,38	8,12	8,12
Truk	31,89	33,84	18,22	62,48
Total	168,58	148,06	127,82	398,79

Tabel 8. Perbandingan konsentrasi emisi SOx terhadap baku mutu

Parameter	*Weekday* Pagi	*Weekday* Sore	*Weekend* Pagi	*Weekend* Sore
SO_x	168,58	148,06	127,82	398,79
Baku Mutu	150	150	150	150



(a)



(b)

Gambar 3. (a) Konsentrasi emisi SO_x; (b) Perbandingan konsentrasi emisi SO_x terhadap baku mutu

NO_x berperan dalam pembentukan ozon troposfer dan partikel sekunder yang berdampak signifikan terhadap kesehatan pernapasan. Paparan jangka panjang dapat menyebabkan penurunan fungsi paru-paru dan peningkatan risiko penyakit pernapasan kronis (Lelieveld *et al*., 2015). Tingginya konsentrasi NO_x pada periode tertentu di kawasan kampus menunjukkan adanya potensi risiko kesehatan yang perlu mendapat perhatian serius.

Untuk parameter SO_x, konsentrasi relatif lebih rendah dibandingkan CO dan NO_x, namun terjadi peningkatan signifikan pada *weekend* sore hingga melampaui baku mutu. Emisi SO_x

berkaitan langsung dengan kandungan sulfur dalam bahan bakar, sehingga kendaraan diesel menjadi sumber utama (Kampa dan Castanas, 2008). Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun regulasi bahan bakar telah menurunkan kadar sulfur secara global, kontribusi lokal dari kendaraan diesel tetap signifikan dalam kondisi tertentu. Sementara itu, SO_x dapat menyebabkan iritasi saluran pernapasan serta pembentukan hujan asam, yang berdampak pada kerusakan vegetasi dan infrastruktur (Kampa dan Castanas, 2008). Dalam lingkungan kampus, hal ini dapat menurunkan kualitas ruang terbuka hijau yang seharusnya berfungsi sebagai penyangga ekologis.

Berdasarkan pola ini, dua variabel utama yang memengaruhi konsentrasi emisi di udara ambien adalah intensitas lalu lintas dan jenis bahan bakar yang digunakan pada kendaraan. Seiring dengan volume kendaraan dan proporsi bahan bakar beremisi yang lebih tinggi, ada peningkatan jumlah pencemar yang dilepaskan ke udara ambien. Oleh karena itu, pengendalian emisi transportasi, terutama kendaraan berbahan bakar bensin dan solar, merupakan langkah penting untuk meningkatkan kualitas udara di sekitar kampus.

Hasil penelitian ini menegaskan bahwa kawasan kampus merupakan bagian dari *micro-urban system* yang memiliki karakteristik emisi spesifik dan memerlukan pengelolaan lingkungan berbasis data. Dalam konsep *sustainable campus*, pengendalian emisi transportasi menjadi komponen penting dalam menciptakan lingkungan yang sehat dan berkelanjutan (Alshuwaikhat dan Abubakar, 2008). Selain itu, dalam perspektif *urban environmental management,* sektor transportasi diidentifikasi sebagai salah satu sumber utama pencemaran udara di kawasan berkembang (Karagulian *et al*., 2015). Oleh karena itu, strategi pengelolaan seperti pembatasan kendaraan bermotor, pengembangan transportasi ramah lingkungan, serta manajemen lalu lintas internal kampus menjadi langkah penting dalam menurunkan emisi. Dengan demikian, kampus tidak hanya berfungsi sebagai pusat pendidikan, tetapi juga sebagai *living laboratory* dalam penerapan prinsip pembangunan berkelanjutan dan pengelolaan kualitas udara berbasis ilmiah.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa aktivitas kendaraan bermotor memberikan kontribusi terhadap perubahan kualitas udara ambien. Konsentrasi emisi CO dan NO_x pada seluruh pengamatan berada di atas baku mutu udara ambien yang ditetapkan oleh PP No. 22 tahun 2021. Sementara itu, emisi SO_x cenderung rendah dibandingkan

denganparameter lain. Namun, pada periode *weekday* pagi masih memiliki nilai konsentrasi emisi yang melebihi baku mutu dan mengalami peningkaktan konsentrasi yang signifikan pada *weekend* sore. Variasi volume lalu lintas dan karakteristik bahan bakar menjadi faktor utama peningkatan konsentrasi emisi. Hal ini menunjukkan bahwa transportasi memberikan kontribusi signifikan terhadap kualitas udara ambien perkotaan.

DAFTAR PUSTAKA

Alshuwaikhat, H. M., Abubakar, I. (2008). An integrated approach to achieving campus sustainability. *Journal of Cleaner Production, 16*(16), 1777–1785. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.10.002

Anggraeni, W., Handriyono, R. E. (2024). Dispersion modeling of SO_2 and NO_X from transportation sources using gaussian model on Krikilan Highway, Driyorejo, Gresik. *Jurnal Teknologi dan Manajemen*, *5*(2), 187–194. DOI: https://doi.org/10.31284/j.jtm.2024.v5i2.5541

Bigazzi, A. Y., Figliozzi, M. A. (2014). Review of urban bicyclists' intake and uptake of traffic-related air pollution. *Transport Reviews, 34*(2), 221–245. https://doi.org/10.1080/01441647.2014.897772

Ersa, N., Akbar, S., Fadhliani, F., Akbar, T., Ikhwali, M. (2023). Analisis beban emisi polusi udara akibat aktivitas transportasi kendaraan bermotor di Jalan Keude Cunda, Kota Lhokseumawe. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil, 13*(2), 391–402. DOI: https://doi.org/10.29103/tj.v13i2.898

European Environment Agency. (2022). *Air quality in Europe—2022 report*. Publications Office of the European Union. https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022

Gately, C. K., Hutyra, L. R., Wing, I. S. (2017). Cities, traffic, and CO_2: A multidecadal assessment of trends, drivers, and scaling relationships. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 114*(8), 1898–1903. https://doi.org/10.1073/pnas.1606034114

Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. IPCC. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/

Kampa, M., Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution, 151*(2), 362–367. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012

Karagulian, F., Belis, C. A., Dora, C. F. C., Prüss-Ustün, A. M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., Amann, M. (2015). Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment, 120*, 475–483. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087

Karner, A. A., Eisinger, D. S., & Niemeier, D. A. (2010). Near-roadway air quality: Synthesizing the findings from real-world data. *Environmental Science & Technology, 44*(14), 5334–5344. https://doi.org/10.1021/es100008x

Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M. J., Colvile, R. N. (2007). Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments. *Atmospheric Environment, 41*(23), 4781–4810. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.02.002

Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (2010). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara di Daerah*. Kementerian Lingkungan Hidup RI.

Kusuma, M. N., Handriyono, R. E., Hafizah, N. E., Damayanti, T. V. (2023). Study of carbon dioxide (CO_2) emissions load from transportation sources in Sukorejo Village Gresik. *Proceedings of the 4th*

International Conference on Advanced Engineering and Technology (ICATECH 2023), 117-123. DOI: 10.5220/0012100800003680

Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality. *Nature, 525*(7569), 367–371. https://doi.org/10.1038/nature15371

Niam, A. C., Handriyono, R. E., Hastuti, I. P., Kusuma, M. N. (2021). Analysis of greenhouse gas emissions from mobile sources in Jombang urban area during the Covid-19 pandemic. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, *19*(3), 582-587. https://doi.org/10.14710/jil.19.3.582-587

Pemerintah Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*.

Rahmasari, R. N., Jati, D. R., Jumiati, J. (2023). Inventarisasi emisi dari sektor transportasi darat di Kota Pontianak. *Jurnal Ilmu Lingkungan, 21*(3), 627–635. https://doi.org/10.14710/jil.21.3.627-635

Seinfeld, J. H., Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Sharma, S., Jain, S., Sharma, P. (2020). Vehicular pollution in urban environments: Status and challenges. *Environmental Monitoring and Assessment, 192*(5), 311. https://doi.org/10.1007/s10661-020-08306-2

Turns, S. R. (2012). *An introduction to combustion: Concepts and applications* (3rd ed.). McGraw-Hill.

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. WHO Press. https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

Zhang, K., Batterman, S. (2013). Air pollution and health risks due to vehicle traffic. *Science of the Total Environment, 450–451*, 307–316. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.074

Zhang, Q., He, K., Huo, H. (2012). Cleaning China's air. *Nature, 484*(7393), 161–162. https://doi.org/10.1038/484161a