

Analisis Dispersi SO₂ dan NO₂ di Kawasan Budaya Kota Yogyakarta Menggunakan Model AERMOD

Ana Uswatun Hasanah^{1*}, Kendra Isma Lutfia², Noviani Ima Wantoputri³, Regina Dewi Kusumawati⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

Corresponding Email: ana.hasanah@uii.ac.id

ABSTRAK

Kota Yogyakarta sebagai pusat budaya dan pariwisata memiliki tingkat aktivitas transportasi yang tinggi, khususnya di kawasan bersejarah dan strategis. Hal ini menyebabkan peningkatan emisi seperti sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen dioksida (NO₂) yang berdampak pada kesehatan masyarakat dan lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dispersi spasial polutan SO₂ dan NO₂ dari aktivitas sektor transportasi menggunakan model AERMOD. Hasil inventarisasi emisi pada 10 ruas jalan penelitian menunjukkan bahwa beban emisi SO₂ tertinggi terdapat di Jalan KH Ahmad Dahlan yaitu sebesar 8.315,31 g/jam, sedangkan beban emisi NO₂ tertinggi terdapat di Jalan Brigjen Katamso yaitu sebesar 704,50 g/jam. Jenis kendaraan bermotor berbahan bakar solar, meskipun jumlahnya relatif lebih sedikit, memiliki kontribusi yang jauh lebih besar terhadap emisi SO₂ dan NO₂ dibandingkan kendaraan berbahan bakar bensin, terutama sepeda motor. Hasil pemodelan menggunakan AERMOD menunjukkan konsentrasi maksimum SO₂ dan NO₂ masing-masing mencapai 53,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 118 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dengan pola sebaran dipengaruhi oleh arah angin dominan dari barat laut dan kecepatan angin yang relatif rendah (0,5–2,1 m/s). Pola spasial hasil simulasi menunjukkan penurunan konsentrasi seiring bertambahnya jarak dari sumber emisi menuju reseptor sensitif, seperti kawasan wisata Malioboro dan Alun-Alun Kidul. Validasi model terhadap data pemantauan aktual (hasil pengukuran instrumen Impinger) menunjukkan nilai RMSPE rata-rata sebesar 24% untuk parameter SO₂ yang masih dalam batas toleransi validasi model, namun nilai RMSPE untuk parameter NO₂ mencapai 59%, yang menunjukkan bahwa estimasi konsentrasi dari model cenderung jauh lebih tinggi dibandingkan hasil pengukuran aktual di lapangan.

Kata kunci: AERMOD, dispersi, emisi, nirogen dioksida, sulsasfur dioksida

ABSTRACT

Yogyakarta City, as a cultural and tourism hub, experiences a high level of transportation activity, particularly in its historical and strategic areas. This results in an increase in emissions, such as sulfur dioxide (SO₂) and nitrogen dioxide (NO₂), which have a negative impact on public health and the environment. This study aims to analyze the spatial dispersion of SO₂ and NO₂ pollutants from transportation sector activities using the AERMOD model. The results of the emission inventory on 10 research roads indicate that the highest SO₂ emission load is found on Jalan KH Ahmad Dahlan, at 8,315.31 g/hour. In contrast, the highest NO₂ emission load is observed on Jalan Brigjen Katamso, at 704.50 g/hour. The type of diesel-fueled motorized vehicles, although relatively fewer in number, has a much greater contribution to SO₂ and NO₂ emissions than gasoline-fueled vehicles, especially motorcycles. The modeling results using AERMOD showed that the maximum concentrations of SO₂ and NO₂ reached 53.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 118 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively, with the distribution pattern influenced by the dominant wind direction from the northwest and relatively low wind speed (0.5–2.1 m/s). The spatial pattern of the simulation results showed a decrease in concentration as the distance from the emission source to the sensitive receptors increased, such as the Malioboro and Alun-Alun Kidul tourist areas. Validation of the model against actual monitoring data (Impinger instrument measurement results) yielded an average RMSPE value of 24% for the SO₂ parameter, which remained within the model validation tolerance limit. However, the RMSPE value for the NO₂ parameter reached 59%, indicating that the model's concentration estimate tended to overestimate the actual value.

Keywords: AERMOD, dispersion, emission, nirogen dioxide, sulfur dioxide

1. Pendahuluan

Kualitas udara merupakan faktor penting yang sangat mempengaruhi kesehatan manusia dan kelestarian lingkungan. Berdasarkan data dari *World Health Organization* (WHO), lebih dari 90% populasi dunia menghirup udara yang tercemar, dengan sekitar 7 juta kasus kematian setiap tahunnya disebabkan oleh paparan polutan udara, seperti partikel halus (PM_{2.5}), nitrogen dioksida (NO₂), dan sulfur dioksida (SO₂) (WHO, 2020). Polutan ini berasal dari berbagai sumber, termasuk transportasi, industri, dan pembakaran bahan bakar fosil, yang berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara ambien dan menimbulkan berbagai masalah kesehatan serta dampak lingkungan. Pencemaran udara terutama menjadi masalah di kawasan perkotaan yang padat, dengan sumber utama berasal dari emisi kendaraan bermotor, industri, dan pembangkit listrik berbahan bakar fosil.

Kota Yogyakarta, sebagai kota dengan peran penting dalam sektor pendidikan, budaya, dan pariwisata, memiliki kawasan strategis yang mencakup situs-situs budaya dan sejarah seperti Alun-Alun Utara, Alun-Alun Selatan, Keraton Yogyakarta, Masjid Gedhe, Taman Sari, dan berbagai destinasi lain yang setiap tahunnya menarik ribuan wisatawan dari dalam maupun luar negeri. Aktivitas pariwisata yang tinggi di kawasan ini didukung oleh mobilitas kendaraan bermotor yang intensif sehingga mengakibatkan jalan di sekitar kawasan ini menjadi pusat lalu lintas yang padat sepanjang hari. Kendaraan bermotor yang mendominasi di kawasan ini menghasilkan emisi termasuk SO₂ dan NO₂. SO₂ merupakan polutan berbahaya yang dapat berdampak negatif terhadap kesehatan manusia, terutama melalui paparan jangka panjang seperti gangguan pernapasan dan kardiopulmoner, serta memicu terjadinya fenomena hujan asam. NO₂ merupakan gas reaktif yang dapat menyebabkan iritasi pada saluran pernapasan, memperburuk penyakit asma, serta berkontribusi terhadap pembentukan ozon troposferik dan partikel sekunder (PM_{2.5}), yang keduanya berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan.

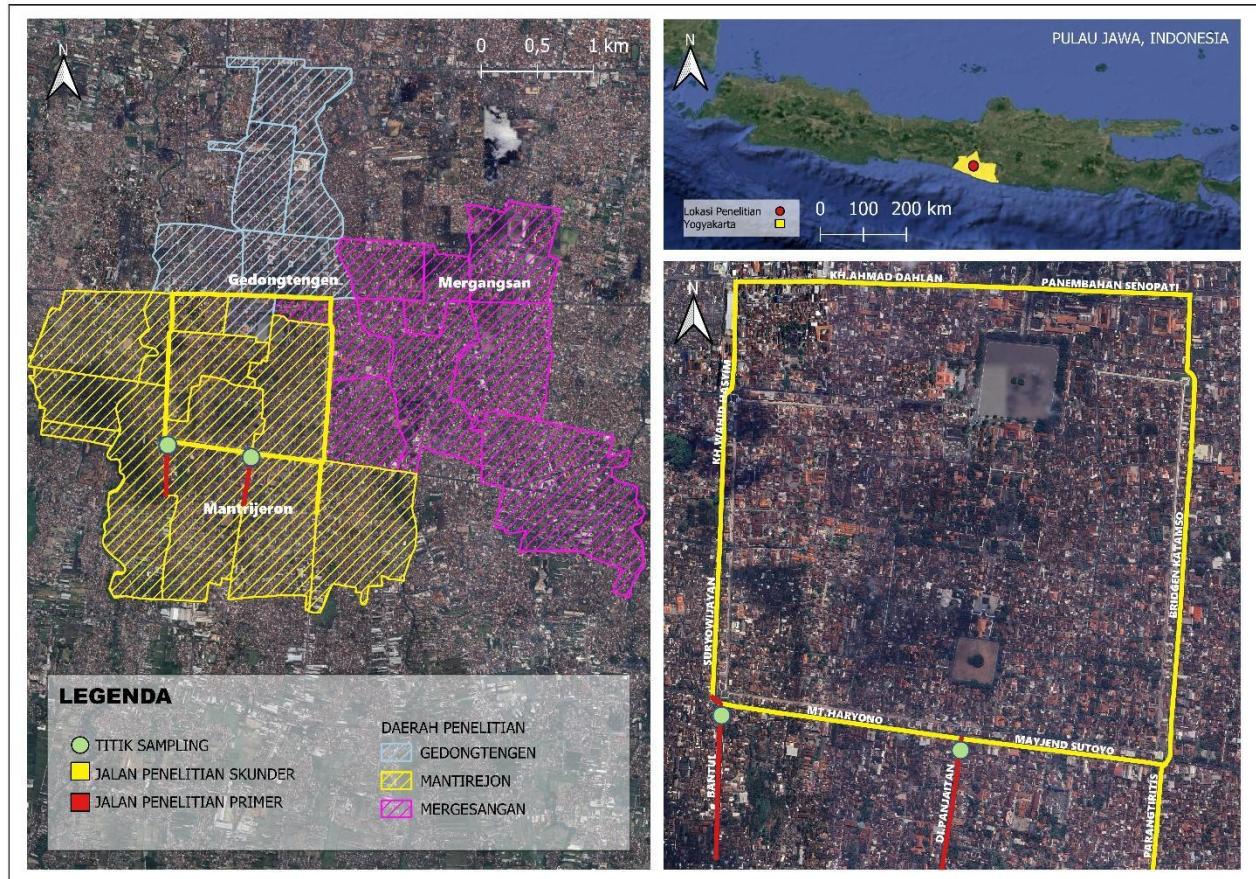
Pemantauan kualitas udara merupakan salah satu langkah strategis dalam upaya pengendalian pencemaran udara, yang umumnya dilakukan melalui Stasiun Pemantauan Kualitas Udara (SPKU). SPKU memiliki peran penting dalam menyediakan data kuantitatif mengenai konsentrasi polutan udara di lokasi tertentu. Akan tetapi, jumlah SPKU di Kota Yogyakarta masih sangat terbatas, sehingga menyebabkan data yang dihasilkan kurang representatif untuk mendukung tindakan preventif terhadap penurunan kualitas udara. Selain itu, karakteristik pemantauan SPKU yang bersifat titik (*point-based*) belum mampu menggambarkan sebaran polutan secara menyeluruh dalam skala spasial. Oleh karena itu, pendekatan berbasis pemodelan menjadi solusi alternatif yang dapat digunakan untuk mengestimasi persebaran konsentrasi polutan dalam jangkauan jarak yang lebih luas. AERMOD (*American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model*) merupakan salah satu perangkat lunak yang dapat digunakan untuk mensimulasikan penyebaran polutan di atmosfer berdasarkan pendekatan parameter meteorologi, sumber emisi, dan kondisi geografis wilayah studi (Katika & Karuchit, 2018). Model ini dapat memproyeksikan sebaran polutan dari berbagai jenis sumber, termasuk sumber titik, area, volume, serta sumber bergerak seperti kendaraan bermotor.

Pada penelitian ini, sumber emisi yang dikaji berasal dari kegiatan sektor transportasi di Kota Yogyakarta. Studi yang dilakukan oleh Natsir dkk. (2017) menggunakan pendekatan *line source modeling* dalam AERMOD untuk menganalisis hubungan atau keterkaitan antara jumlah dan jenis kendaraan dengan konsentrasi gas karbon monoksida (CO) di empat ruas jalan Kota Yogyakarta. Hasil menunjukkan tingkat efektivitas model yang baik dalam menggambarkan persebaran polutan dan dampak pencemaran udara di wilayah ini. Selain itu, pada penelitian Sarwono dkk. (2021), lebih berfokus pada kawasan industri PLTU, dengan pendekatan Gaussian untuk cerobong sebagai sumber titik. Akan tetapi, studi yang secara khusus menganalisis dispersi SO₂ dan NO₂ dari sektor transportasi di Kawasan Perkotaan Yogyakarta masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kekurangan tersebut dengan menganalisis distribusi spasial polutan SO₂ dan NO₂ di sepanjang ruas jalan Kawasan Budaya, Kota Yogyakarta menggunakan AERMOD guna menyediakan informasi ilmiah sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan kualitas udara di kawasan tersebut.

2. Bahan dan Metode

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian berada di Kawasan Wisata Budaya Yogyakarta. Secara geografis, kawasan ini terletak di pusat Kota Yogyakarta dan menjadi tempat berlangsungnya berbagai kegiatan budaya, ekonomi, dan pariwisata. Wilayah kajian tersebut secara spasial dapat dilihat pada peta yang ditampilkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Peta Wilayah Kajian

Ruas jalan diklasifikasikan menjadi jalan primer dan jalan sekunder. Jalan primer merupakan ruas jalan utama yang digunakan untuk menghitung volume kendaraan secara langsung serta mengukur konsentrasi SO_2 dan NO_2 menggunakan instrumen impinger. Sementara itu, jalan sekunder adalah ruas jalan pendukung yang volume kendaraannya dihitung melalui rekaman *CCTV* sebagai pelengkap data aktivitas lalu lintas di kawasan tersebut. Klasifikasi ini bertujuan untuk memperoleh representasi kondisi yang komprehensif terhadap beban emisi dan kualitas udara akibat aktivitas sektor transportasi di kawasan penelitian.

Tabel 1. Alat dan Bahan

No	Proses	Kebutuhan Data	Alat dan Bahan
1	Inventarisasi Emisi	Jaringan jalan: Peta ruas jalan, koordinat jalan, dimensi jalan (panjang dan lebar), fungsi jalan	Ms. Excel, ArcGIS, dan AERMOD
		Volume lalu lintas per ruas jalan tiap jenis kendaraan (ATCS Kota Yogyakarta)	Ms. Excel dan ArcGIS
		Faktor emisi SO ₂ dan NO ₂ tiap jenis kendaraan per kategori bahan bakar	Ms. Excel
2	Pengukuran Kualitas Udara Ambien	Kadar SO ₂ (Impinger)	Alat: Impinger, <i>Flow Meter</i> , Pengatur Waktu (<i>timer</i>), <i>anemometer</i> , <i>hygrometer</i> , <i>Barometer</i> , <i>spectrofotometer</i> UV-Vis, gelas ukur, gelas <i>beaker</i> , labu ukur, pipet volume, corong kaca, <i>cooler box</i> , rak dan tabung reaksi. Bahan : larutan pararosanilin hidroklorida (Amalia, 2022), formaldehida, asam sulfat pekat, larutan penyerap SO ₂ (formaldehida dalam air murni), serta larutan standar SO ₂ untuk kalibrasi.
		Kadar NO ₂ (Impinger)	Alat: Impinger, <i>flow meter</i> , pengatur waktu (<i>timer</i>), <i>anemometer</i> , <i>hygrometer</i> , <i>barometer</i> , <i>spectrofotometer</i> UV-Vis, gelas ukur, gelas <i>beaker</i> , labu ukur, pipet volume, pipet tetes, corong kaca, statif dan klem, botol semprot aquades, <i>cooler box</i> , rak dan tabung reaksi. Bahan: Larutan Griess-Saltzman (campuran asam asetat glasial, sulfanilamida, dan N-(1-naftil)-etilendiamin dihidroklorida), larutan penyerap NO ₂ (larutan NaOH encer atau air murni yang ditambahkan reagen Griess-Saltzman), larutan standar natrium nitrit (NaNO ₂) untuk kalibrasi, serta aquades.
3	Pemodelan Dispersi Pencemar Udara menggunakan AERMOD	Data <i>hourly</i> meteorologi bulan Februari 2024 – Januari 2025 (<i>base elevation</i> , <i>anemometer height</i> , arah dan kecepatan angin, suhu, kelembapan, tekanan, presipitasi, radiasi, <i>cloud cover</i>)	Ms. Excel, ODV, WRPlot, AERMET
		Peta tata guna lahan dan domain studi	AERMAP
		Peta kontur permukaan (<i>terrain</i>)	AERMAP
4	Uji validasi model	Uji korelasi	Microsoft Excel

Pengambilan data dalam penelitian ini mencakup beberapa tahapan proses, antara lain inventarisasi emisi, pengukuran serta uji kualitas udara di lapangan dan laboratorium, dan simulasi dispersi polutan dalam model AERMOD. Beberapa tahapan ini memerlukan kebutuhan data yang diambil secara primer maupun sekunder, yang selengkapnya ditampilkan dalam Tabel 1.

2.2 Metode Penelitian

2.2.1 Inventarisasi Emisi

Pengolahan data hasil inventarisasi emisi dari sumber garis dilakukan untuk memperoleh estimasi beban emisi parameter NO₂ dan SO₂. Mengacu pada Pedoman Teknis Inventarisasi Emisi Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) Tahun 2018, jaringan jalan utama seperti jalan arteri dan jalan kolektor diklasifikasikan sebagai sumber emisi berbasis garis (*line source*), sedangkan jalan lokal dikategorikan sebagai sumber emisi berbasis area (*area source*). Klasifikasi jenis kendaraan yang dihitung dan nilai faktor emisi mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010, antara lain mencakup sepeda motor, mobil penumpang, mobil pick up, truk, dan bus, dengan jenis bahan bakar bensin maupun solar. Adapun persamaan matematika yang digunakan untuk menghitung total beban emisi dari sumber garis disajikan sebagai berikut.

$$VKT_{j,line} = \sum_{i=1}^n Q_{ji} \times I_i \quad (1)$$

$$E_{cji} = VKT_{ji} \times EF_{cj} \quad (2)$$

Keterangan:

$E_{j,i}$ = Beban emisi kendaraan kategori j pada ruas jalan i (gr/jam)

$VKT_{j,i}$ = Kendaraan kategori j pada ruas jalan i yang dihitung sebagai sumber garis (km/jam)

EF_j = Faktor emisi kendaraan kategori j (gr/km)

$Q_{j,i}$ = Volume kendaraan kategori j pada ruas jalan i (kendaraan/jam)

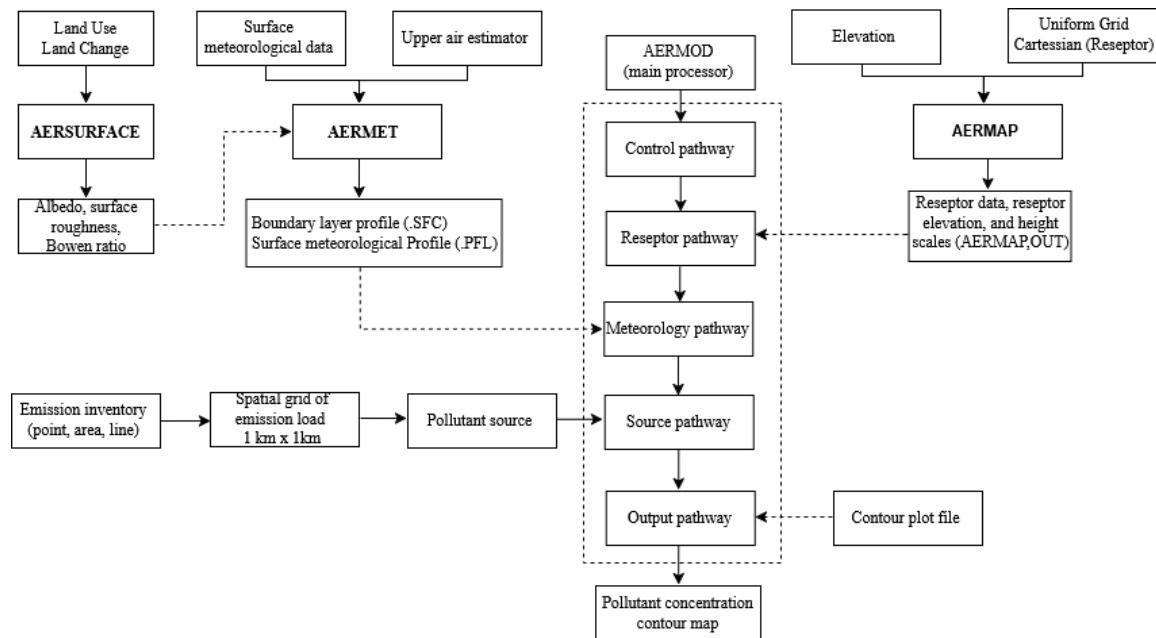
L_i = Panjang ruas jalan i (km)

2.2.2 Pengukuran Konsentrasi NO₂ dan SO₂ menggunakan Instrumen Impinger

Konsentrasi NO₂ di udara ambien diukur berdasarkan prosedur pengujian SNI 7119.2-2017 dengan metode *Griess Saltzman* sedangkan konsentrasi SO₂ berdasarkan prosedur pengujian SNI 19-7119.7-2017 dengan metode *pararosaniline*. Konsentrasi ini dianalisis dengan menggunakan alat spektrofotometer dengan sampel yang dianalisis berjumlah masing-masing dua buah yang berasal dari dua titik lokasi pemantauan.

2.2.3 Simulasi Dispersi NO₂ dan SO₂

Persebaran polutan NO₂ dan SO₂ dianalisis berdasarkan hasil simulasi dari model dispersi AERMOD (EPA, 2019). Secara umum, tahapan proses terdiri dari tahapan *pre processor* (AERMET dan AERMAP) dan *main processor* (AERMOD) yang akan menghasilkan output berupa peta kontur konsentrasi (Amouzouvi dkk., 2020). Seluruh tahapan ini secara komprehensif dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Tahapan Simulasi Dispersi Polutan dalam Model Dispersi AERMOD

Sumber : Hasanah, 2025

2.3.4 Uji Valdasi Model

Perhitungan galat model dianalisis menggunakan perhitungan nilai *Root Mean Squared Percent Error* (RMSPE) dengan formula sebagai berikut.

$$\text{RSMPE} = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{n=1}^n x \left(\frac{st-At}{At} \right)^2} \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan:

st = Nilai konsentrasi simulasi pada waktu t

At = Nilai konsentrasi aktual pada waktu t

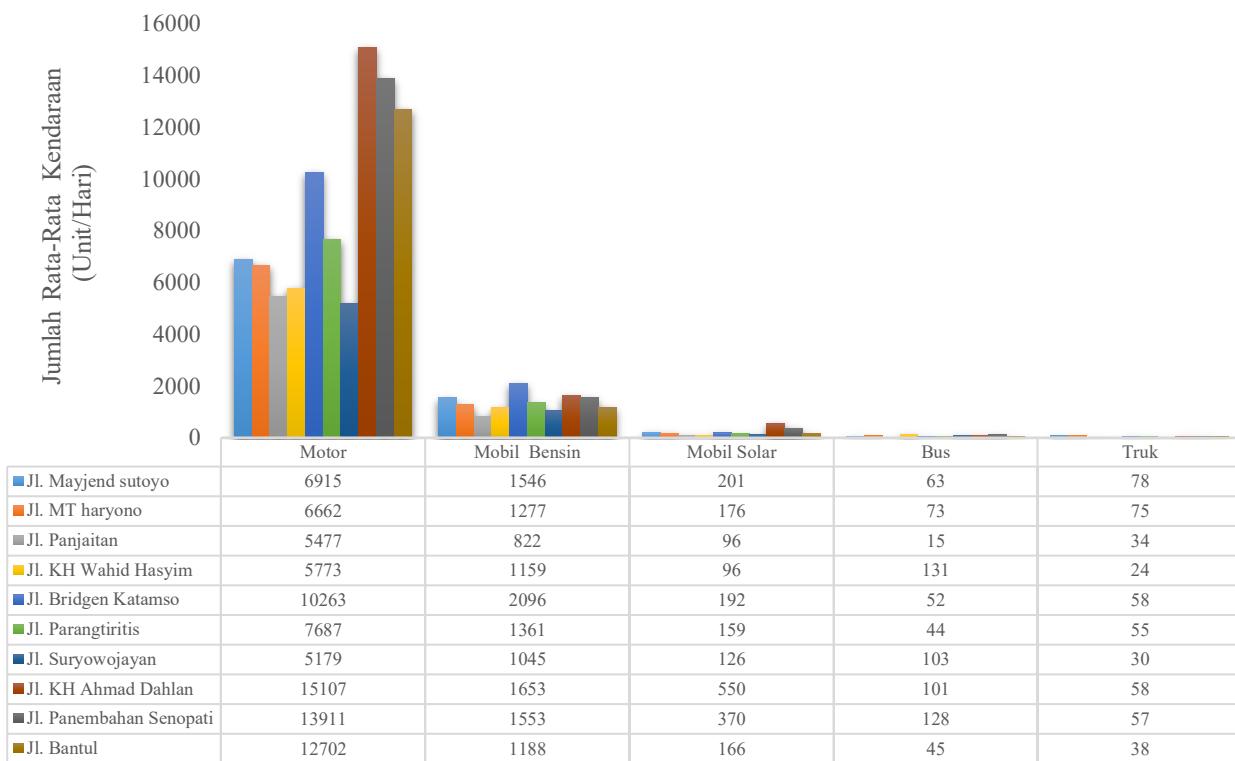
n = Jumlah titik pengukuran

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Inventarisasi Emisi Sumber Garis

3.1.1 Karakteristik Jumlah dan Jenis Kendaraan Tiap Ruas Jalan

Perhitungan inventarisasi emisi kendaraan diperoleh dari 10 ruas jalan arteri di Kawasan Budaya Yogyakarta dengan jenis kendaraan yang dihitung meliputi motor, mobil penumpang, bus, dan truk. Jumlah kendaraan paling banyak berada di ruas Jalan KH Ahmad Dahlan dengan total 17.469 kendaraan, sedangkan jumlah kendaraan paling sedikit berada di ruas Jalan DI Panjaitan dengan total 6.444 kendaraan. Jumlah rata-rata volume kendaraan setiap kategori per hari ditampilkan dalam Gambar 3.



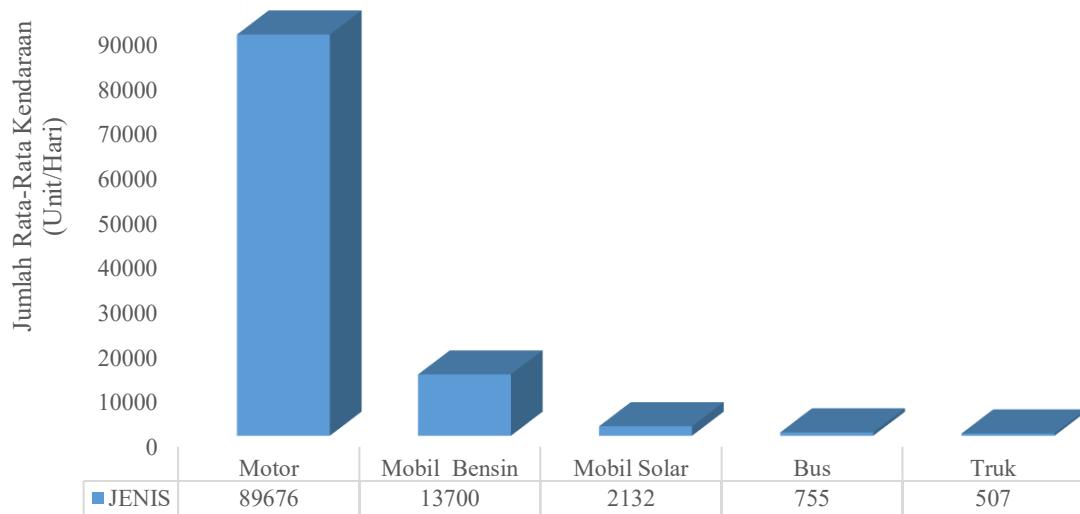
Gambar 3. Rekapitulasi Rata-Rata Perhitungan Volume Kendaraan

Volume kendaraan di Jalan KH Ahmad Dahlan tercatat paling tinggi dibandingkan ruas jalan lainnya yang ditinjau dalam penelitian ini. Hal ini dapat dijelaskan oleh letak geografis jalan tersebut yang berada di pusat Kota Yogyakarta serta berdekatan dengan kawasan wisata dan perdagangan utama seperti Malioboro, Pasar Beringharjo, dan Titik Nol Kilometer. Jalan ini berfungsi sebagai koridor utama yang menghubungkan berbagai aktivitas sosial-ekonomi. Hal ini diperkuat oleh Munawar & Kamulyan (2021), yang mencatat dominasi sepeda motor ($\pm 70\%$) dan kendaraan umum ($\pm 20\%$) di kawasan Malioboro, serta peningkatan volume kendaraan hingga 31% pada akhir pekan pasca penutupan sebagian ruas jalan. Sebagai akses utama menuju Malioboro, Jalan KH Ahmad Dahlan secara langsung terdampak peningkatan beban lalu lintas tersebut. Sehingga mengalami arus lalu lintas yang padat sepanjang hari, terutama pada jam sibuk dan akhir pekan. Tingginya konsentrasi fasilitas publik dan destinasi wisata di sekitar jalan ini turut mendorong tingginya intensitas pergerakan kendaraan pribadi maupun angkutan umum.

Sebaliknya, Jalan DI Panjaitan terletak di bagian selatan Kota Yogyakarta yang berbatasan langsung dengan Kabupaten Bantul dan lebih bersifat sebagai jalan penghubung antar kawasan kota dan pinggiran. Fungsi jalan ini lebih dominan sebagai akses lokal dibandingkan sebagai rute utama menuju pusat kota atau destinasi wisata. Karakteristik ini menyebabkan volume kendaraan yang melintas cenderung lebih rendah. Wanto et al. (2020) mencatat derajat kejemuhan sebesar 0,56 (Level of Service C) pada jalan ini, yang menunjukkan arus lalu lintas masih stabil dan tidak padat. Selain itu, keterbatasan fungsi komersial dan wisata di sepanjang Jalan DI Panjaitan juga turut mempengaruhi rendahnya intensitas aktivitas transportasi di kawasan tersebut.

3.1.2 Total Volume dan Jenis Kendaraan

Jumlah dan jenis kendaraan, serta tipe bahan bakar akan mempengaruhi besar nilai beban emisi. Berdasarkan hasil perhitungan, jenis kendaraan yang paling mendominasi lalu lintas adalah sepeda motor dengan jumlah 89.676 unit, diikuti oleh mobil berbahan bakar bensin sebanyak 13.700 unit, serta mobil berbahan bakar solar, bus, dan truk sebanyak 2.132-unit, 755 unit, dan 507 unit. Distribusi volume kendaraan berdasarkan jenis dan tipe bahan bakar ditampilkan dalam Gambar 4.

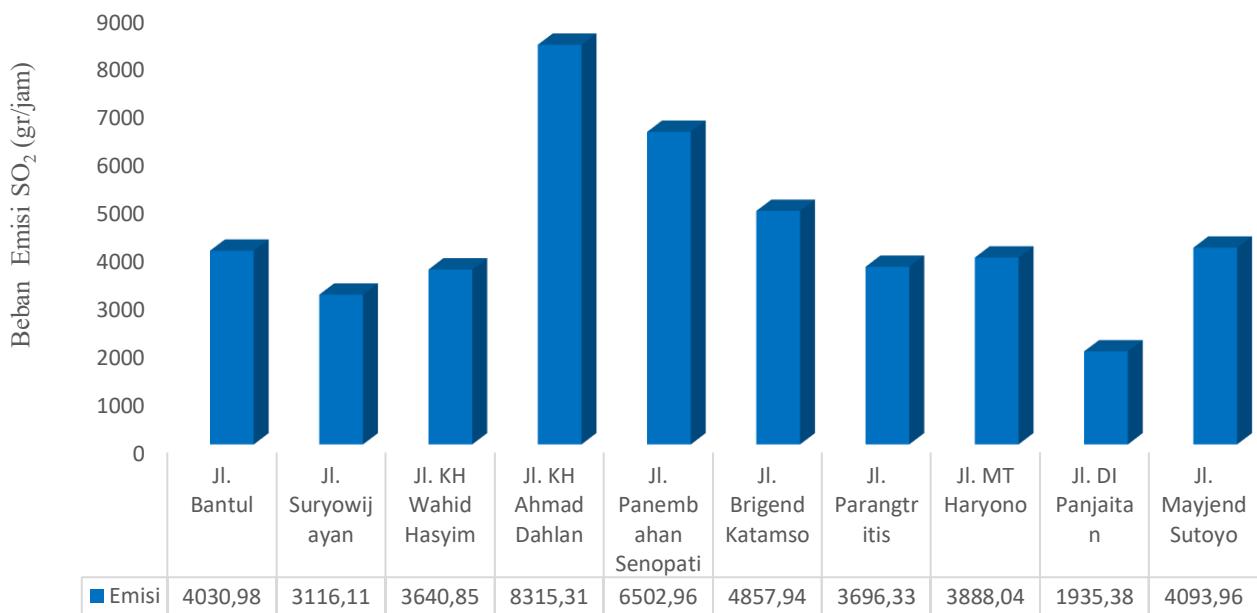
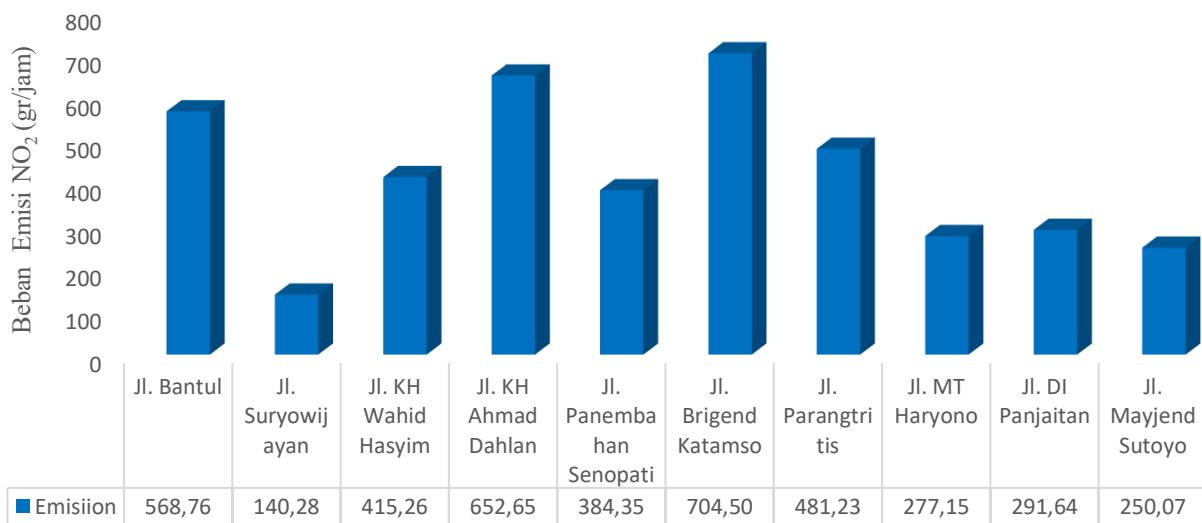


Gambar 4. Perbandingan Volume Kendaraan Berdasarkan Jenis

Data *Electronic Registration and Identification* (ERI) Korlantas Polri per 8 Januari 2025 menyatakan bahwa jumlah kendaraan bermotor di Kota Yogyakarta mengalami peningkatan signifikan, mencapai 710.280 unit. Sepeda motor tetap menjadi jenis kendaraan yang paling dominan dengan jumlah 590.340 unit, diikuti oleh mobil penumpang sebanyak 103.840 unit, mobil beban 14.650-unit, bus 1.115 unit, dan kendaraan khusus sebanyak 317 unit. Data volume kendaraan ini mencerminkan dominasi sepeda motor di jalan raya selaras dengan data yang diperoleh dalam penelitian ini, khususnya pada waktu-waktu padat aktivitas. Peningkatan jumlah sepeda motor menunjukkan tingginya ketergantungan masyarakat terhadap moda transportasi roda dua untuk mobilitas harian, terutama dalam mendukung aktivitas ekonomi, pendidikan, dan sosial. Selain itu, jumlah kendaraan umum di Kota Yogyakarta yang sedikit dan terbatas juga mempengaruhi tingginya tingkat penggunaan kendaraan pribadi.

3.1.3 Beban Emisi SO₂ dan NO₂

Analisis beban emisi SO₂ dan NO₂ dilakukan untuk mengidentifikasi kontribusi polusi udara dari masing-masing ruas jalan berdasarkan intensitas lalu lintas dan jenis kendaraan yang melintas. Emisi dihitung dalam satuan gram per jam (g/jam), yang mencerminkan potensi pencemaran udara dari sumber bergerak. Untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif, hasil perhitungan akumulasi emisi di setiap ruas jalan disajikan dalam bentuk diagram pada Gambar 5 dan Gambar 6. Variasi nilai emisi antar ruas jalan merefleksikan perbedaan karakteristik lalu lintas, tipe kendaraan, jenis bahan bakar yang digunakan, serta dimensi dan fungsi jalan. Faktor-faktor ini mempengaruhi besarnya emisi polutan yang dilepaskan ke udara ambien dari aktivitas transportasi di kawasan studi.

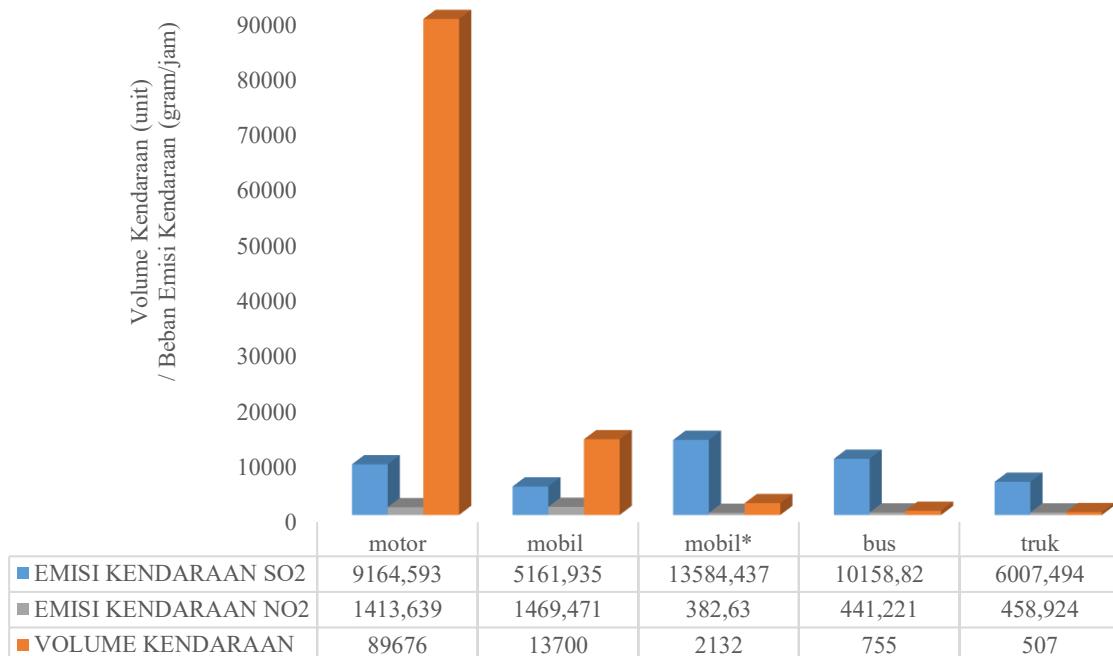

 Gambar 5. Beban Emisi SO₂ Pada Tiap Ruas Jalan

 Gambar 6. Beban Emisi NO₂ Pada Tiap Ruas Jalan

Berdasarkan Gambar 5, Jalan KH Ahmad Dahlan menunjukkan beban emisi SO₂ tertinggi sebesar 8.315,31 g/jam, diikuti oleh Jalan Panembahan Senopati (6.502,96 g/jam) dan Jalan Brigjen Katamso (4.857,94 g/jam). Sementara itu, beban emisi SO₂ terendah tercatat di Jalan DI Panjaitan dengan nilai 1.935,38 g/jam. Tingginya emisi di ruas-ruas jalan tertentu berkorelasi erat dengan volume lalu lintas yang tinggi serta dominasi kendaraan berbahan bakar fosil, terutama solar dan bensin, yang diketahui sebagai kontributor utama emisi SO₂. Sementara itu, pada Gambar 6 menunjukkan bahwa beban emisi NO₂ tertinggi terdapat di Jalan Brigjen Katamso sebesar 704,50 g/jam, diikuti oleh Jalan KH Ahmad Dahlan sebesar 652,65 g/jam, dan Jalan Bantul sebesar 568,76 g/jam. Nilai emisi NO₂ yang tinggi di Jalan Brigjen Katamso tidak hanya disebabkan oleh volume

kendaraan, tetapi juga oleh dimensi jalan yang lebih panjang dibandingkan dengan ruas lainnya, sehingga menghasilkan akumulasi emisi yang lebih besar dalam satuan waktu yang sama. Hal ini mengindikasikan bahwa panjang dan fungsi jalan turut mempengaruhi besarnya kontribusi emisi polutan.

3.1.4 Karakteristik Volume Kendaraan dan Nilai Beban Emisi

Analisis hubungan antara volume kendaraan dan beban emisi dilakukan untuk memahami kontribusi relatif masing-masing jenis kendaraan terhadap emisi SO₂ dan NO₂. Data ini bertujuan untuk mengidentifikasi jenis kendaraan yang memberikan beban emisi paling signifikan terhadap pencemaran udara, khususnya SO₂ dan NO₂ di Kawasan Budaya Yogyakarta.

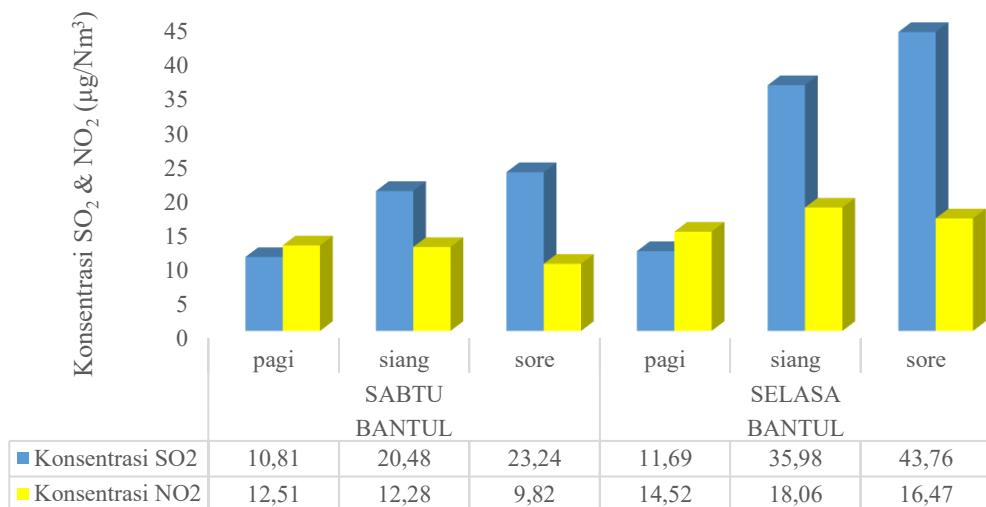


Gambar 7. Karakteristik Tingkat Beban Emisi SO₂ dan NO₂ dengan Volume Kendaraan

Gambar 7 menunjukkan bahwa sepeda motor memiliki volume kendaraan tertinggi sebesar 89.676 unit, namun menghasilkan emisi SO₂ dan NO₂ yang relatif rendah yaitu 9.164,59 gram/jam dan 2.143,69 gram/jam. Sebaliknya, kendaraan berbahan bakar solar seperti mobil solar, truk, dan bus, meskipun jumlahnya lebih sedikit, menunjukkan beban emisi yang jauh lebih tinggi. Mobil solar menyumbang emisi NO₂ tertinggi sebesar 15.518,82 gram/jam dan emisi SO₂ sebesar 3.584,87 gram/jam, diikuti oleh truk dan bus. Perbandingan ini mengindikasikan bahwa besarnya emisi tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah kendaraan yang melintas, tetapi juga sangat bergantung pada jenis bahan bakar, faktor emisi, serta panjang dan lebar jalan. Kendaraan diesel cenderung memiliki konsumsi bahan bakar lebih besar serta tingkat emisi lebih tinggi dibandingkan kendaraan berbahan bakar bensin (Instantinova dkk., 2013).

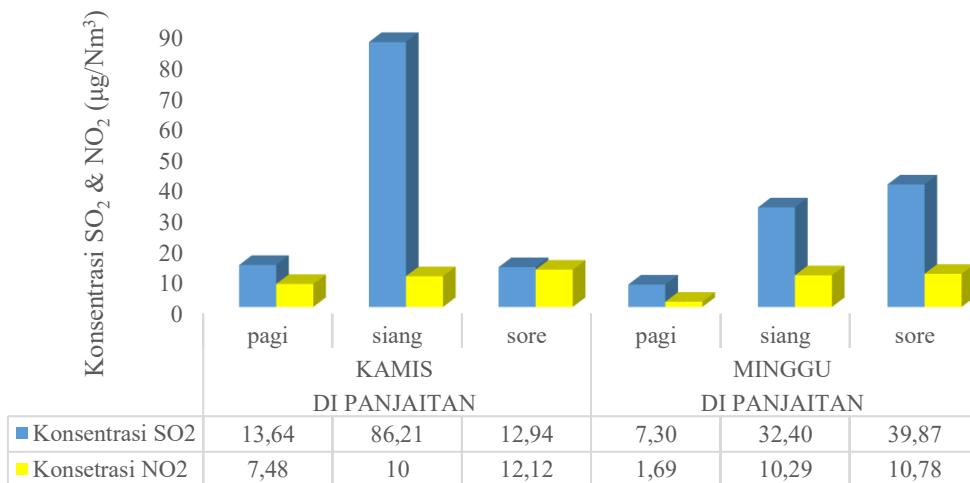
3.2 Hasil Pengukuran Konsentrasi SO₂ dan NO₂ menggunakan Instrumen Impinger

Pengambilan sampel uji dilakukan di dua titik pada hari kerja dan hari libur. Pengambilan di dua hari tersebut bertujuan untuk mendapatkan perbandingan antara dua kondisi hari serta agar memperoleh data yang lebih representatif. Pengukuran nilai konsentrasi ini dilakukan selama 1 jam pada pagi, siang, dan sore hari menyesuaikan dengan pengambilan data perhitungan kendaraan. Data yang diperoleh selanjutnya akan digunakan untuk memvalidasi hasil model pada dua lokasi titik pemantauan ini dengan cara merata-ratakan kedua data.



Gambar 8. Konsentrasi SO₂ dan NO₂ Hasil Pengukuran Impinger di Jalan Bantul

Pada Gambar 8, konsentrasi SO₂ di Jalan Bantul tertinggi tercatat sebesar 43,76 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ pada hari Selasa, 04 Februari 2025 sore pukul 16.00–17.00, sedangkan nilai terendah sebesar 10,81 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ terjadi pada Sabtu pagi pukul 08.00–09.00. Sementara itu, pada Gambar 9, konsentrasi SO₂ di Jalan DI Panjaitan mencapai puncaknya pada hari Kamis, 30 Januari 2025 siang pukul 12.00–13.00 sebesar 86,21 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, dan nilai terendah tercatat sebesar 7,30 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ pada Minggu pagi. Pola ini menunjukkan bahwa konsentrasi SO₂ cenderung meningkat pada hari kerja dan jam sibuk, yang mencerminkan pengaruh signifikan emisi kendaraan bermotor terhadap peningkatan kadar polutan di udara ambien.



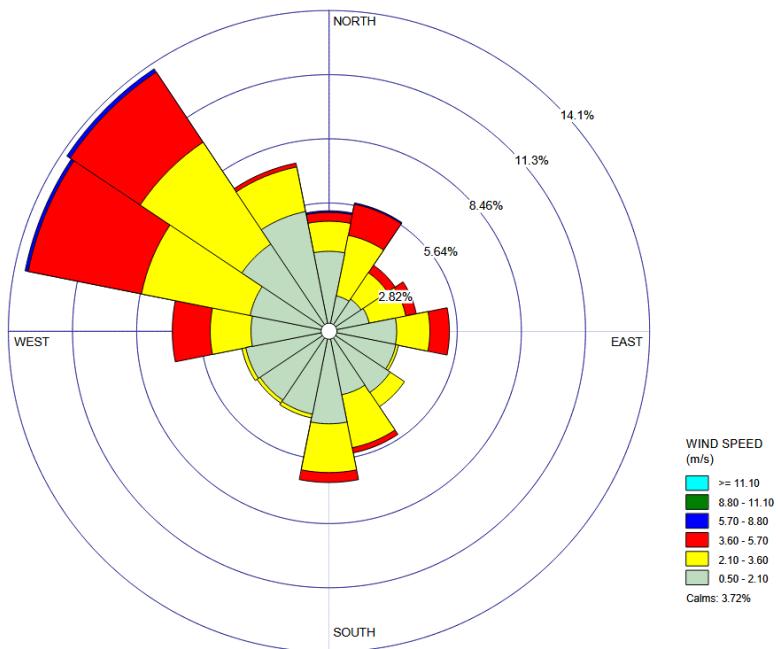
Gambar 9. Konsentrasi SO₂ dan NO₂ Hasil Pengukuran Impinger di Jalan DI Panjaitan

Sementara itu, konsentrasi NO₂ di Jalan Bantul tertinggi tercatat sebesar 18,06 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ pada hari Selasa 04 Februari 2025 pada siang hari pukul 12.00 – 13.00 dan konsentrasi terendah sebesar 9,82 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ terjadi pada hari Sabtu 01 Februari 2025 pada sore hari pukul 16.00 – 17.00. Sedangkan pada Gambar 9, konsentrasi NO₂ di Jalan DI Panjaitan tertinggi tercatat sebesar 12,12 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ pada hari Kamis 30 Januari 2025 pada sore hari pukul 16.00 – 17.00 dan konsentrasi terendah sebesar 1,69 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ pada hari Minggu 02 Februari 2025 pada pagi hari pukul 08.00 – 09.00. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi SO₂ dan NO₂ pada kedua lokasi tersebut masih berada di bawah baku mutu udara ambien sesuai Lampiran VII dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, dengan nilai baku mutu parameter SO₂ adalah 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan NO₂ adalah 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk durasi pengukuran selama 1 jam.

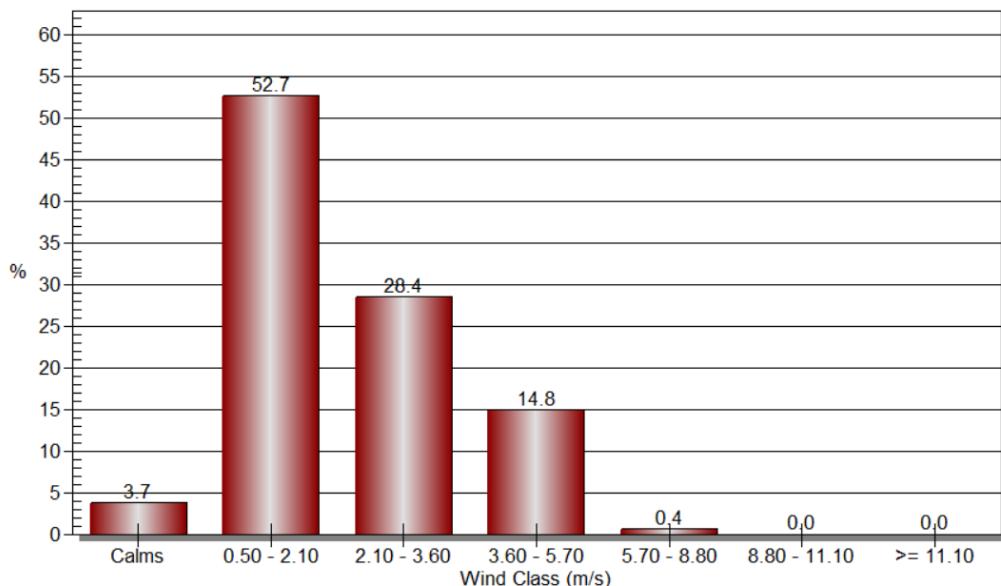
3.3 Hasil Simulasi Model AERMOD

3.3.1 Arah Persebaran dan Kecepatan Angin Dominan

Kondisi meteorologi khususnya arah dan kecepatan angin berperan penting dalam persebaran konsentrasi polutan SO_2 dan NO_2 di atmosfer (Fifianah & Amalia, 2024). Kecepatan angin yang rendah cenderung meningkatkan konsentrasi polutan di sekitar sumber emisi, begitupun sebaliknya. Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan WRPLLOT View yang terdapat dalam Gambar 10 dan 11 menunjukkan pola sebaran arah angin di lokasi penelitian dominan berasal dari barat laut dengan frekuensi sebesar 14,1%. Kecepatan angin pada lokasi kajian didominasi oleh angin lemah atau angin dengan kecepatan rentang 0,5-2,1 m/s dalam persentase frekuensi sebesar 52,7%.



Gambar 10. Arah kecepatan Rata-Rata Tahun 2024-2025 di Wilayah Kota Yogyakarta

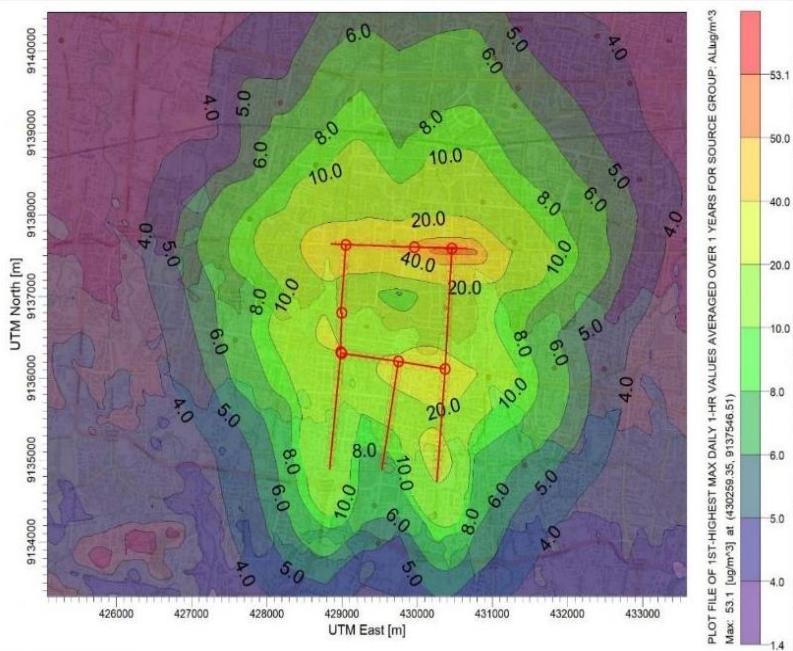


Gambar 11. Distribusi Frekuensi Kelas Kecepatan Angin Lokasi Pengukuran

3.3.2 Persebaran Spasial Konsentrasi SO_2 dan NO_2

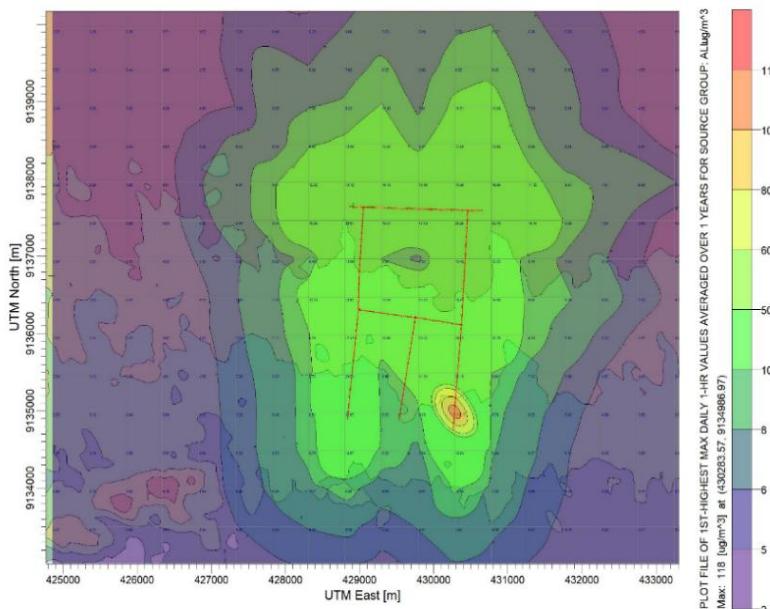
Proses simulasi model dispersi AERMOD memerlukan beberapa input data antara lain meteorologi (tutupan awan, suhu, kelembaban, tekanan udara, arah angin, kecepatan angin, radiasi matahari, dan *ceiling height* selama satu tahun), beban emisi, reseptor, topografi, dsb. Data

meteorologi permukaan dan *upper air* sangat berperan penting dalam proses transport dan transformasi polutan SO₂ dan NO₂ (Wangsa dkk., 2022). Pada penelitian ini, data meteorologi permukaan tersebut diperoleh dari data satelit yang berasal dari *Copernicus Data Store* yang dikelola oleh *The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF).



Gambar 12. Peta Sebaran Rata-Rata Konsentrasi SO₂ Periode 1 jam

Berdasarkan hasil pemodelan AERMOD pada Gambar 12, konsentrasi maksimum SO₂ menunjukkan nilai sebesar 53,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada koordinat X: 430295,8 dan Y: 9137465,1. Pola sebaran menunjukkan penurunan konsentrasi secara radial menjauhi titik sumber, terutama ke arah timur dan tenggara, yang mengindikasikan adanya pengaruh signifikan dari arah angin dan jarak terhadap proses dispersi di kawasan dengan kepadatan lalu lintas yang tinggi. Konsentrasi SO₂ hasil model pada dua titik jalan utama yang juga dijadikan sebagai titik pengukuran secara langsung dengan menggunakan instrumen Impinger, yakni Jalan Bantul dan Jalan DI Panjaitan, masing-masing menunjukkan nilai sebesar 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



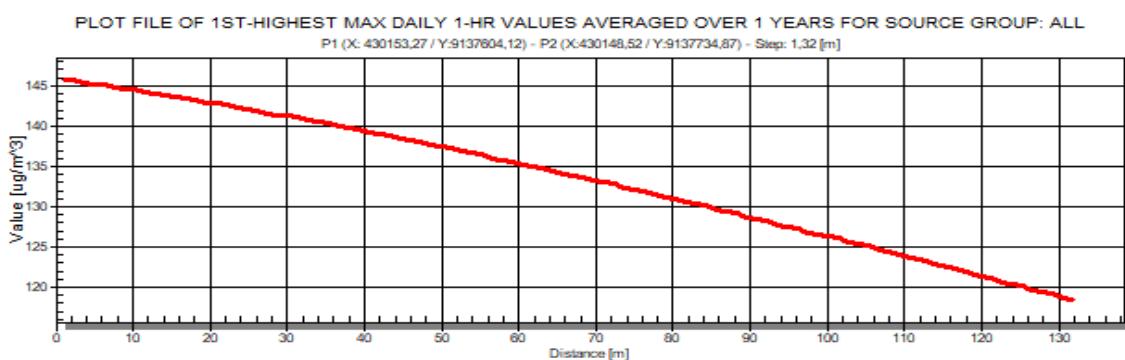
Gambar 13. Peta Sebaran Rata-Rata Konsentrasi NO₂ Periode 1 jam

Sementara itu, konsentrasi maksimum NO_2 pada Gambar 13, menunjukkan hasil pemodelan AERMOD mencapai $118 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan konsentrasi terendah sebesar $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, yang masing-masing berada pada koordinat X: 430272,1 dan Y: 9134987 serta X: 434751,4 dan Y: 9131503. Pada lokasi Jalan Bantul, konsentrasi NO_2 menunjukkan nilai sebesar $18,97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan pada Jalan DI Panjaitan sebesar $13,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Meskipun nilai-nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan rata-rata hasil pengukuran aktual di lapangan, keduanya masih berada dalam ambang batas ambang sesuai dengan peraturan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021, yaitu sebesar $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk SO_2 dan $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk NO_2 .

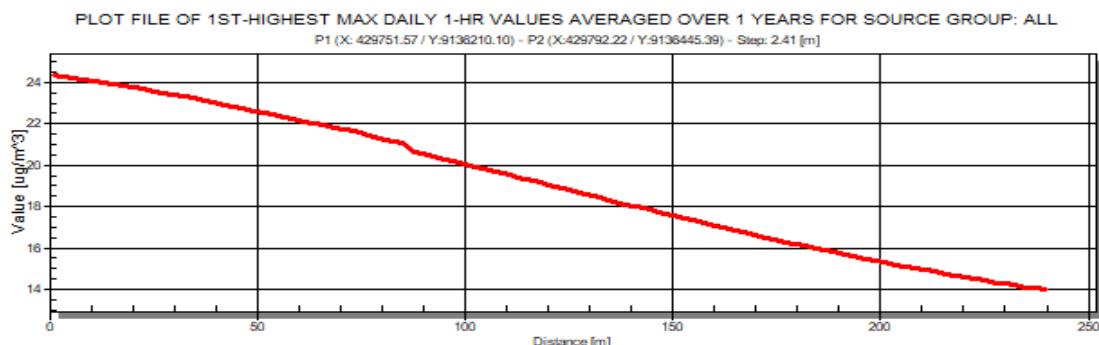
3.3.3 Pola Sebaran Konsentrasi NO_2 dan SO_2 terhadap Reseptor Sensitif

Pola sebaran konsentrasi SO_2 dan NO_2 dari hasil pemodelan menunjukkan potensi pengaruh terhadap reseptor sensitif di area sekitar sumber emisi. Lokasi yang dikaji dalam penelitian ini meliputi tempat wisata Malioboro dekat Jalan Panembahan Senopati dan Alun-Alun Kidul dekat Jalan MT Haryono. Tempat ini dikaji karena merupakan lokasi dengan tingkat aktivitas manusia harian yang tinggi khususnya anak-anak dan lansia, sehingga perlu dilaksanakan analisis sebaran polutan pada jangkauan jarak tertentu.

Pada Gambar 14, konsentrasi SO_2 menunjukkan pola penurunan dari titik sumber emisi di Jalan Panembahan Senopati menuju reseptor di kawasan Malioboro. Konsentrasi tercatat mengalami penurunan bertahap dari $144 \mu\text{g}/\text{m}^3$ menjadi $118 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada jarak ± 130 meter dari sumber. Pola ini mencerminkan karakteristik umum dispersi polutan di atmosfer, konsentrasi menurun seiring bertambahnya jarak akibat pengaruh dinamika atmosferik, seperti arah dan kecepatan angin. Sementara itu, Gambar 15 memperlihatkan bahwa konsentrasi NO_2 juga mengalami penurunan dari titik emisi di Jalan MT Haryono menuju reseptor di kawasan Alun-Alun Kidul. Pada jarak 100 meter, konsentrasi NO_2 berkurang dari $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ menjadi $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Selanjutnya, tren serupa diperkuat dengan hasil pemodelan spasial lainnya, yang menunjukkan penurunan konsentrasi NO_2 dari $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ menjadi $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada lintasan sejauh ± 260 meter dari titik emisi.



Gambar 14. Pola Sebaran Konsentrasi SO_2 dari Jalan Panembahan Senopati menuju Lokasi Malioboro



Gambar 15. Pola Sebaran Konsentrasi NO_2 dari Jalan MT Haryono menuju Lokasi Alun-Alun Kidul

Pola penurunan konsentrasi SO_2 dan NO_2 tersebut mengindikasikan bahwa mekanisme dispersi atmosfer berjalan secara efektif dalam mereduksi tingkat pencemaran udara pada area yang lebih jauh dari sumber emisi. Efektivitas ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk arah angin dominan, kecepatan angin, serta kondisi topografi lokal (Abiye dkk., 2016). Temuan ini penting sebagai dasar pengambilan kebijakan dalam perlindungan kualitas udara, khususnya di wilayah dengan keberadaan reseptor sensitif seperti kawasan wisata dan permukiman padat.

3.4 Hasil Uji Validasi Model AERMOD

Validasi model dilakukan dengan metode RMSPE (*Root Mean Square Percentage Error*) dengan membandingkan hasil pemodelan dan data pengukuran lapangan secara langsung. Validasi model diperlukan untuk menilai tingkat kepercayaan suatu model, karena terdapat berbagai faktor yang dapat menyebabkan ketidaksesuaian antara hasil pemodelan dan pengukuran langsung. Ketidakakuratan dalam pemodelan kualitas udara dapat terjadi, sehingga menyebabkan hasil prediksi model dapat lebih rendah (*under prediction*) atau lebih tinggi (*over prediction*) dari nilai aktual (Munir dkk., 2020).

Tabel 2. Hasil Uji Validasi Model AERMOD

Jenis Polutan	Nama Jalan	Model ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	Sampling ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)	RMSPE	RMSPE
Konsentrasi SO_2	DI Panjaitan	27	32	17%	24%
	Bantul	17	24	30%	
Konsentrasi NO_2	DI Panjaitan	13	8	36%	59%
	Bantul	18	13	76%	

Batas nilai RMSPE yang umum digunakan untuk model ialah $<25\%$. Tingkat keakuratan suatu model dikatakan sesuai atau terpenuhi jika nilai RMSE yang didapatkan $<25\%$ model dapat diterima dan $<10\%$ model baik (Reed dkk., 2015). Berdasarkan hasil perbandingan antara data pemodelan dan hasil pengukuran lapangan yang terdapat dalam Tabel 2, nilai *Root Mean Square Percentage Error* (RMSPE) untuk konsentrasi SO_2 di Jalan DI Panjaitan adalah sebesar 17%, sedangkan di Jalan Bantul mencapai 30%. Rata-rata RMSPE untuk parameter SO_2 sebesar 24%, yang masih berada dalam batas toleransi validasi model. Meskipun demikian, nilai RMSPE di Jalan Bantul telah melampaui ambang batas 25%, yang menunjukkan kecenderungan model untuk melakukan prediksi berlebihan (*overpredicted*). Sementara itu, pada parameter NO_2 , perbedaan antara hasil pemodelan dan data pengukuran lebih signifikan. Nilai RMSPE mencapai 36% di Jalan DI Panjaitan dan 76% di Jalan Bantul, dengan rata-rata sebesar 59%. Tingginya nilai RMSPE ini mengindikasikan bahwa model cenderung menghasilkan estimasi konsentrasi NO_2 yang jauh lebih tinggi dibandingkan hasil pengukuran aktual di lapangan.

4. Kesimpulan

Kajian simulasi dispersi NO_2 dan SO_2 menggunakan model AERMOD masing-masing menunjukkan hasil yang *overpredicted* dan *underpredicted* terhadap data pemantauan aktual. Nilai galat (error) yang dihasilkan dalam pemodelan ini masih tergolong tinggi, sehingga diperlukan kajian lanjutan untuk meningkatkan akurasi dan representativitas model terhadap kondisi nyata di lapangan. Validitas model yang baik sangat penting sebagai dasar dalam pengambilan keputusan strategis terkait pengelolaan kualitas udara di wilayah studi. Untuk meningkatkan keandalan hasil pemodelan pada penelitian selanjutnya, beberapa upaya yang dapat dilakukan antara lain penambahan titik pemantauan kualitas udara secara langsung di lapangan, terutama pada setiap ruas jalan utama, penggunaan aplikasi atau perangkat lunak yang mampu menghitung jumlah serta spesifikasi jenis kendaraan secara real time, serta mempertimbangkan pengaruh faktor lingkungan seperti keberadaan bangunan, vegetasi, dan topografi terhadap proses transportasi dan transformasi polutan di atmosfer.

Daftar Pustaka

Abiye, O. E., Sunmonu, L. A., Ajao, A. I., Akinola, O. E., Ayoola, M. A., & Jegede, O. O. (2016). Atmospheric dispersion modeling of uncontrolled gaseous pollutants (SO₂ and NO_x) emission from a scrap-iron recycling factory in Ile-Ife, Southwest Nigeria. *Cogent Environmental Science*, 2(1). <https://doi.org/10.1080/23311843.2016.1275413>

Amalia, S. (2022). Analisis Sulfur Dioksida (SO₂) Udara Ambient Menggunakan Metode Pararosanilin dengan Spektrofotometer UV-Visible Kabupaten Bandung, Jawa Barat. *Gunung Djati Conference Series*, 15(2774–6585), 11–15.

Amouzouvi, Y. M., Dzagli, M. M., Sagna, K., Török, Z., Roba, C. A., Mereuă, A., Ozunu, A., & Edjame, K. S. (2020). Evaluation of pollutants along the national road N2 in Togo using the AERMOD dispersion model. *Journal of Health and Pollution*, 10(27). <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.27.200908>

EPA, U. S. (2019). AERMOD Implementation Guide. EPA-454/B-19-035. *AERMOD Implementation Workgroup. Office of Air*.

Fifianah, M., & Amalia, A. (2024). *Analysis of the Influence of Meteorological Factors on SO₂ and NO₂ Gas Concentrations from the Boiler Chimney of Sugar Factory Analisis Pengaruh Faktor Meteorologi Terhadap Konsentrasi Gas SO₂ dan NO₂ dari Cerobong Ketel Pabrik Gula X*. 9, 70–76.

Hasanah, A. U. Strategi pengelolaan kualitas udara berbasis model prediktif (AERMOD) di sekitar kawasan PT X. *Environmental Engineering Journal ITATS*, 5(1):24–39.

Istantinova, D. B., Hadiwidodo, M., & Handayani, D. S. (2013). Terhadap Konsentrasi Gas Pencemar Sulfur Dioksida (SO₂) Dalam Udara Aambien di sekitar PT. INTI GENERAL YAJA STEEL Semarang. *Tentang Konsentrasi Gas Sulfur*, 10(Gas Sulfur), 1–10.

Katika, K., & Karuchit, S. (2018). Estimation of Urban Air Pollutant Levels using AERMOD: A Case Study in Nakhon Ratchasima, Thailand. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 164(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/164/1/012024>

Munawar, A., & Kamulyan, F. A. (2021). *Analysis of the impact of traffic and pedestrianization environment in Malioboro*. Journal of Engineering and Technological Sciences, 53(2), 148–162. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.2.5>

Munir, S., Mayfield, M., Coca, D., Mihaylova, L. S., & Osammor, O. (2020). Analysis of Air Pollution in Urban Areas with Airviro Dispersion Model—A Case Study in the City of Sheffield, United Kingdom. *Atmosphere*, 11(3), 285. Doi: <https://doi.org/10.3390/atmos11030285>.

Natsir, T. A., Pambarep, Y. W., Susetyaningsih, R., Setyanto, K., dan Triastianti, R. D. (2017). Penggunaan AERMOD untuk kajian simulasi dampak pencemaran karbon monoksida di Kota Yogyakarta akibat emisi kendaraan bermotor. *Jurnal Manusia Dan Lingkungan*, 24(1), 11. <https://doi.org/10.22146/jml.23631>

Reed, K. F., Casper, D. P., France, J., & Kebreab, E. (2015). Prediction of Nitrogen Efficiency in Dairy Cattle: A review. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 10(001). <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201510001>

Sarwono, E., Adnan, F., & Rafi, M. M. (2021). Muara Jawa, Kabupaten Kutai Kartanegara. *Jurnal Teknologi Lingkungan UNMUL*, 5(2), 17–34.

Ramli, M. I., Rani, N. M., & Zafany, A. A. (2023). Air Quality Analysis and Dispersion Modelling by Using AERMOD for Amonia (NH₃) Parameters on Toll Roads in Makassar City. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1134(1), 1–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1134/1/012011>

Wangsa, D., Bachtiar, V. S., & Raharjo, S. (2022). Uji Model Aeromod Terhadap Sebaran Particulate Matter 10 μm (PM10) di Sekitar Kawasan PT Semen Padang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2), 291–301. <https://doi.org/10.14710/jil.20.2.291-301>

Wanto, A. D., Suhendra, L., & Setiawan, R. (2020). *Pengaruh gerak U-turn terhadap kinerja lalu lintas di Jalan D.I. Panjaitan, Yogyakarta*. Jurnal Karya Teknik Sipil, 9(4), 92–100. <https://journal.ums.ac.id/index.php/kts/article/view/10236>