

Pemodelan Sebaran SO₂ Menggunakan *Software* AERMOD di Sekitar Titik Nol Yogyakarta

Modeling of SO₂ Distribution Around Point Zero of Yogyakarta Using AERMOD Software

Indri Anida Putri¹, Nur Iswanto ^{1*)}, Lina Wahyuni¹, Silviani²

¹ Prodi Magister Teknik Lingkungan, Fakultas Pascasarjana, Institut Teknologi Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia

² Prodi Magister Ilmu Lingkungan, Fakultas Pascasarjana, Institut Teknologi Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia

^{*)} Corresponding Author: nur_iswanto@yahoo.com

ABSTRAK

Article history:

Received: 22 January 2025

Revised: 24 January 2026

Accepted: 24 January 2026

Available online: 24 January 2026

Kata kunci:

SO₂

Titik Nol Yogyakarta

AERMOD

Kawasan Titik Nol adalah kawasan yang sangat penting dan strategis bagi Kota Yogyakarta. Kawasan tersebut menjadi sentra perekonomian, destinasi wisata, cagar budaya, serta kawasan pendidikan. Tingginya intensitas kegiatan termasuk besarnya kunjungan wisatawan juga membawa dampak negatif bagi lingkungan Kawasan Titik Nol, dan salah satunya adalah pencemaran udara. Penelitian dilaksanakan untuk mengetahui tingkat pencemaran udara, khususnya konsentrasi SO₂ dan memprediksi sebaran konsentrasi SO₂ di daerah ini menggunakan *software* AERMOD. AERMOD merupakan model dispersi spasial kualitas udara. Sampel udara diambil menggunakan midged impinger. Pengaruh kecepatan angin, kelembaban, suhu terhadap konsentrasi SO₂ dianalisis dan kemudian dimodelkan. Hasil penelitian kualitas udara melebihi ambang batas baku mutu yang ditentukan oleh Pemerintah. Hasil SO₂ pada hari pertama di titik-titik sampel adalah 879,9 µg/m³ (titik A), 903,9 µg/m³ (titik B dan C) dan pada pengambilan sampel hari kedua sebesar 849,6 µg/m³ (titik A), 755,9 µg/m³ (titik B), 778,8 µg/m³ (titik C), 774,5 µg/m³ (titik D). Prediksi Sebaran SO₂ di Yogyakarta menggunakan *software* AERMOD dan hasil dari windrose sejauh 100 m sampai dengan 600 m ke arah timur dari sumber polutan.

ABSTRACT

Keywords:

SO₂

Point Zero Yogyakarta

AERMOD

The Zero Point Area is a very important and strategic area for the City of Yogyakarta. This area is an economic center, tourist destination, cultural heritage and educational complex as well. The high intensity of various activities, including the large number of tourists to visit, also has a negative impact on the Zero Point Area environment, and one of them is air pollution. The research was carried out to determine the level of air pollution, especially SO₂ concentrations and to predict the distribution of SO₂ concentrations in this area using AERMOD *software*. AERMOD is a spatial dispersion model of air quality. Air samples were taken using an impinger. The influence of wind speed,

humidity, temperature on SO₂ concentration was analyzed and then modeled using AERMOD. The two days of air quality measurements showed that the concentrations were exceeded the quality standard threshold stipulated by the Government. SO₂ concentrations measured at three different point samplings on the first day were 879.9 µg/m³(point A), 903.9 µg/m³(point B and C), and on the second day sampling on four points were 849.5 µg/m³ (point A), 755.9 µg/m³ (point B), 778.8 µg/m³(point C), 774.4 µg/m³(point D). The prediction of SO₂ emission in Zero Point of Yogyakarta City by using AERMOD software and windrose showed that the gas pollutant dispersed between 100 m to 600 m to the east from the pollutant source.

PENDAHULUAN

Titik Nol Yogyakarta

Titik Nol Yogyakarta adalah persimpangan empat yang ramai oleh kendaraan karena berada di pusat Kota Yogyakarta dan berada di Kecamatan Gondomanan yang terdiri dari 2 kelurahan, yakni Kelurahan Prawirodirjan dan Ngupasan serta memiliki luas kurang lebih 115 Ha. Di kawasan ini berdiri banyak bangunan penting dan bersejarah, seperti Keraton Yogyakarta, Istana Negara, Kantor Pos, Gedung Bank Indonesia, Benteng Vredeburg, Taman Pintar. Kawasan ini juga merupakan ujung selatan dari sebuah jalan yang sangat penting bagi pariwisata dan perekonomian Kota Yogyakarta, yakni Jalan Malioboro, serta Pasar Beringharjo yang menjadi pusat penjualan berbagai model pakaian batik yang terkenal (Marlena *et al.*, 2018). Berbagai kegiatan yang berpusat di Kawasan Titik Nol selain menimbulkan dampak positif, juga berimplikasi pada lingkungan khususnya kualitas udara di kawasan tersebut, sebagai akibat dari beban lalu lintas yang cukup tinggi.

Pencemaran Udara

Pencemaran udara merupakan masalah lingkungan yang sangat serius, karena selain menurunkan kualitas udara juga dapat menyebabkan penipisan ozon, meningkatnya emisi gas rumah kaca, terjadinya hujan asam serta terjadinya perubahan iklim secara global (Tangga *et al.*, 2015). Salah satu sumber pencemaran udara terbesar adalah sektor transportasi. Meningkatnya jumlah kendaraan bermotor telah meningkatkan konsumsi bahan bakar minyak, sekaligus meningkatkan jumlah emisi polutan di udara. Pertambahan jumlah kendaraan yang tidak diimbangi dengan peningkatan kapasitas jalan, terutama di kota-kota besar menyebabkan kemacetan dan berdampak pada peningkatan penggunaan bahan bakar minyak dimana salah satu polutan yang paling berbahaya adalah gas sulfur dioksida (SO₂).

Sulfur Dioksida (SO₂)

Gas SO₂ adalah gas yang sangat mudah terlarut dalam air, memiliki bau yang tajam namun tidak berwarna. Pencemar sekunder yang terbentuk dari SO₂ adalah partikel sulfat yang

dapat berpindah dan terdeposisi jauh dari sumbernya. SO_2 dan gas oksida sulfur lainnya terbentuk dalam proses pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung sulfur. Sulfur dikandung oleh hampir semua bahan bakar seperti minyak mentah dan batubara. Selain SO_2 , polutan gas sulfur lainnya adalah SO_3 (sulfur trioksida), dan keduanya disebut SO_x . Gas SO_3 tidak mudah terbakar di udara dan merupakan senyawa yang tidak reaktif (Putri, 2017). SO_x memiliki sifat antara lain bau yang tajam, bersifat korosif, beracun karena selalu mengikat oksigen untuk mencapai kestabilan fase gas. Konsentrasi gas SO_2 di udara akan mulai terdeteksi oleh indera manusia manakala konsentrasinya berkisar antara 0,3–1 ppm. SO_2 di udara akan diabsorpsi dan akan bereaksi dengan butiran air (*droplet*) membentuk senyawa sulfat.

Dampak Pencemaran SO_2

Dampak yang ditimbulkan oleh senyawa SO_2 di udara adalah iritasi saluran pernapasan dan gejala batuk, sesak napas, dan meningkatkan penyakit asma (Muziansyah *et al.*, 2015). Hal ini dikarenakan gas SO_2 yang berubah menjadi senyawa asam akan menyerang selaput lendir pada hidung, tenggorokan, dan saluran pernafasan lain hingga ke paru paru. Selain sistem pernafasan, gas SO_2 juga dapat menyerang mata manusia menyebabkan iritasi pada bagian tubuh yang terkena (Putri, 2017). Kadar SO_2 sebesar 5 ppm atau lebih akan menimbulkan iritasi pada tenggorokan. SO_2 sangat berbahaya bagi orang tua dan penderita yang mengalami penyakit kronis pada sistem pernafasan, dan merupakan iritan pada kulit dan selaput lendir. Pada konsentrasi 6–12 ppm SO_2 mudah diserap oleh selaput lendir saluran pernafasan bagian atas. Pada kondisi dingin dan pada konsentrasi yang lebih besar dapat meningkatkan produksi lendir di saluran pernafasan bagian atas, dan apabila kadarnya bertambah besar maka akan terjadi reaksi peradangan yang hebat pada selaput lendir disertai dengan paralisis silia dan apabila berulang kali terkena paparan maka adanya iritasi yang berulang ulang dapat menyebabkan terjadi hiperplasia dan metaplasia pada sel sel epitel dan dapat menyebabkan terjadinya kanker (Putri, 2017).

Kadar SO_2 yang tinggi di udara telah diketahui dapat mengakibatkan kerusakan pada bangunan. Kadar SO_2 yang rendah pun dapat menyebabkan terjadinya korosi terutama pada logam dan pelapukan pada material bangunan. Kandungan SO_2 bereaksi dengan uap air membentuk H_2SO_4 atau dikenal sebagai hujan asam yang dapat menimbulkan kerusakan baik material, benda, maupun tanaman (Suyono, 2014).

Baku Mutu Udara Ambien

Lampiran VII Peraturan Pemerintah Republik Indonesia 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, yakni tentang batas maksimum bahan pencemar yang diperbolehkan ada di udara, dijelaskan tentang 13 parameter yang diatur sebagai baku mutu udara ambien yang berlaku secara nasional, kecuali jika Gubernur menetapkan baku mutu udara ambien yang lebih ketat dalam baku mutu udara ambien daerah, termasuk SO_2 . Tabulasi baku mutu udara ambien khususnya SO_2 seperti di dalam Lampiran VII PP 22 tahun 2021 adalah tercantum di dalam Tabel 1.

Tabel 1. Baku Mutu SO₂ Di Dalam Udara Ambien dan Pengukurannya

Waktu Pengukuran	Baku Mutu	Sistem Pengukuran
1 jam	150 µg/m ³	Aktif kontinyu Aktif manual
24 jam	75 µg/m ³	Aktif kontinyu
1 tahun	45 µg/m ³	Aktif kontinyu

Sumber: Lampiran VII PP nomor 22 tahun 2021

AERMOD

AERMOD adalah perangkat lunak (*software*) yang dikembangkan oleh US *Environmental Protection Agency* (US-EPA) berdasarkan model dispersi *Plume Gaussian Steady State* untuk memprediksi dispersi polusi udara atau sebaran konsentrasi polutan di udara dalam jarak pendek, yakni kurang dari 50 km dari sumber pencemaran, baik untuk daerah perkotaan maupun daerah pedesaan (Yazdi *et al.*, 2016).

AERMOD merupakan pemodelan yang menggabungkan dispersi udara, data meteorologi, dan morfologi yang berbasiskan struktur *turbulensi planetary boundary layer* dan profil elevasi muka tanah. Data meteorologi yang harus dimasukkan ke dalam *software* AERMOD adalah *surface profile* dan *upper air data*. Kedua data tersebut dapat diperoleh sebagai hasil keluaran *Weather Research Forecasting* (WRF) model, baik sebagai data primer maupun data sekunder yang harus diturunkan dari data primer (Shaikh *et al.*, 2018). Algoritma di dalam perangkat lunak ini memungkinkan untuk pemodelan meteorologi, ekstraksi, dan pemrosesan data dari WRF hingga menjadi *input* untuk AERMOD secara otomatis. Keunggulan dari model ini adalah mudah, sederhana, dan efisien dalam memprediksi sebaran polutan.

Perangkat lunak AERMOD terdiri dari 3 (tiga) bagian, yakni AERMET, AERMAP, dan AERMOD *Gaussian Plume Model* dengan modul *Planetary Boundary Layer* (PBL). AERMET merupakan perangkat lunak untuk mengolah data meteorologi, AERMAP merupakan perangkat lunak untuk mengolah data morfologi, sedangkan AERMOD untuk memodelkan pola sebaran emisi. Salah satunya kelebihan AERMOD adalah dapat memprediksi *Ground Level Concentration* (GLC) yang disebabkan oleh PBL sehingga dapat digunakan untuk memprediksi beban pencemaran udara dan penurunan kualitas udara (Natsir *et al.*, 2017). Program AERMAP di dalam AERMOD akan memproses data elevasi tanah dalam format *Digital Elevation Model* (DEM).

Model *Gaussian Plume* dapat digunakan untuk menghitung konsentrasi polutan di dalam udara. Model *Gaussian Plume* ini dapat diaplikasikan untuk sumber titik (*point source*) seperti cerobong *boiler* maupun sumber bergerak (*line source*) seperti knalpot kendaraan motor, dimana dalam aplikasi untuk *line source*, model *Gaussian Plume* mengasumsikan bahwa *line source* adalah sebuah deret dari sejumlah *point source* dimana jumlah konsentrasi pada titik-titik di sepanjang jalan dapat dihitung sebagai jumlah dari deret konsentrasi polutan di sepanjang jalan (Gusrianti & Tarigan, 2017). Model *Gaussian* yang diaplikasikan di dalam AERMOD dianggap model yang paling mudah dan tepat dalam menggambarkan pola tiga dimensi dari sebuah emisi secara matematis (Aslim, 2019). Standar deviasi

persebaran emisi ke arah horizontal dan prediksi diwakili oleh parameter σ_y dan σ_z (Fawwaz, 2017). Penjabaran persamaan dasar *Gaussian* di dalam Persamaan (1) sebagai berikut (Aviantara & Suciati 2021):

$$C(x,y,z,H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)} \left[e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2} \right] \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

- C = konsentrasi polutan pada suatu titik (x,y,z) (μgm^{-3})
- Q = laju emisi (g/detik)
- $\sigma_{y,z}$ = koefisien disperse *Gauss* arah horizontal (y) dan vertical (z), merupakan jarak terhadap x (m)
- u = kecepatan angin rata-rata pada lokasi, arah z (m/detik)
- y = simpangan menurut sumbu y (jarak penerima/ reseptor) (m)
- z = beda ketinggian antara sumber emisi terhadap titik yang terpapar atau tinggi penerima/reseptor (m)
- H = ketinggian efektif sumber pencemar (m)

Faktor Emisi

Faktor emisi adalah koefisien yang menunjukkan besaran emisi per unit kegiatan. Faktor emisi merupakan nilai rata-rata suatu parameter pencemar udara yang dikeluarkan sumber spesifik (Handriyono & Kusuma, 2017). Faktor emisi dapat dipengaruhi oleh jenis kendaraan dan teknologi kendaraan, faktor ini biasanya dinyatakan sebagai berat polutan dibagi dengan satuan berat, volume, jarak, atau lamanya aktivitas yang dapat mengeluarkan polutan. Tabel 2 merupakan tabulasi faktor emisi SO_2 dari berbagai alat transportasi di kota metropolitan dan kota-kota besar sesuai dengan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup nomor 12 Tahun 2010 tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara di Daerah.

Tabel 2. Kategori Kendaraan dan Faktor Emisi SO_2

Kategori Kendaraan	Faktor Emisi SO_2 (g/km)
Sepeda Motor	0,008
Mobil (bensin)	0,026
Mobil (solar)	0,44
Bis	0,93
Truk	0,82
Roda tiga	0,013

Beban emisi merupakan jumlah pencemar yang keluar dari sumber pencemaran, baik sumber titik (*point source*), garis (*line source*), maupun area (*area source*). Penelitian ini menghitung beban emisi gas SO_2 dari kegiatan transportasi (*line source*) di kawasan di sekitar Titik Nol Yogyakarta sepanjang 1 km, sehingga perhitungan beban dan laju emisi menggunakan Persamaan (2) dan (3).

$$Q = EF \times \text{Jumlah Kendaraan} \dots\dots\dots (2)$$

$$m = Q/t \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

Q = Beban Emisi (kg/tahun);

m = Laju Emisi (kg);

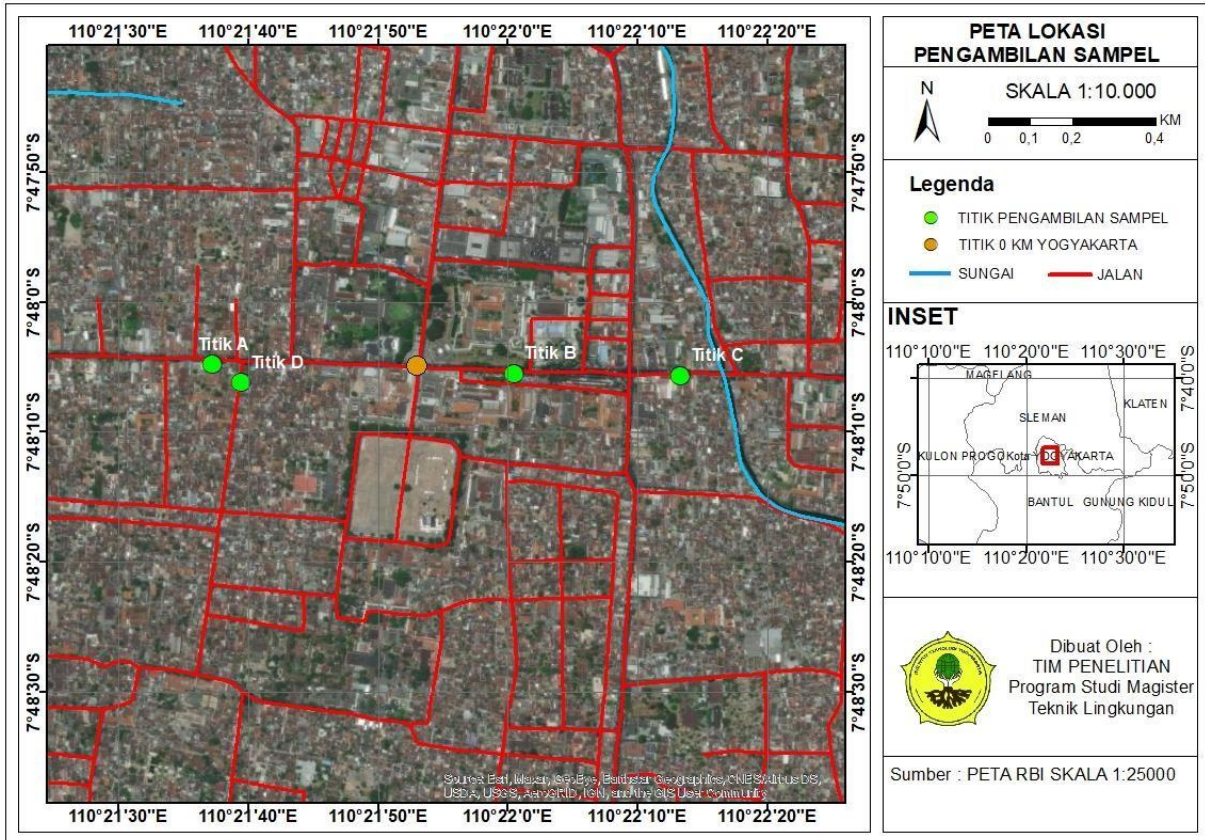
EF = Faktor Emisi (g/km);

t = Waktu (tahun)

BAHAN DAN METODE

Waktu dan Lokasi

Pengambilan sampel jumlah kendaraan dilakukan dengan menggunakan kamera yang dilaksanakan selama 2 (dua) hari di hari kerja, dimulai dari pukul 10.00–14.00 WIB pada tanggal 8 dan 9 September yang merupakan periodedengan kepadatan lalu lintas harian yang tinggi, dan sesuai dengan lampiran VII Peraturan Pemerintah Indonesia nomor 22 Tahun 2021. Lokasi pengambilan sampel adalah titik-titik yang mewakili kawasan sekitar Titik Nol Yogyakarta dengan radius 500 m sehingga jarak terjauh dari 2 (dua) titik yaitu titik A dan titik C adalah 1.000 m atau 1 km. Titik sampel A di depan Masjid At- Tahkim Jln. KH. Ahmad Dahlan nomor 73; titik sampel B berada di Jln. Panembahan Senopati yang berada di sebelah selatan Benteng Vredeburg berjarak kurang lebih 700 m dari titik A ke arah timur, dan titik sampel C berada di sisi barat Jembatan Sayidan, Jln. Sultan Agung. Titik Sampel D adalah titik kontrol berada di selatan PKU Muhammadiyah, Jln. Nyai Ahmad Dahlan no. 5. Pemilihan lokasi penelitian pada titik A, B, dan C dilakukan secara sengaja (*purposive*) dengan pertimbangan bahwa jalan-jalan tersebut merupakan poros jalan utama yang melintasi Titik Nol Yogyakarta sehingga merupakan jalur lalu lintas yang cukup padat dan jarak titik terjauh adalah 1 km untuk mewakili perhitungan beban emisi seperti di dalam Persamaan (2) dan Persamaan (3). Pemilihan lokasi ini juga ditetapkan berdasarkan survei pendahuluan untuk menentukan jam-jam paling sibuk/padat dalam sehari. Lokasi penelitian dan lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Titik Sampel Udara di Sekitar Titik Nol Yogyakarta

Alat Dan Bahan

Peralatan dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah anemometer, *midget impinger*, pompa hisap, kuvet, *flowmeter*, pipet ukur 5 ml, pipet gondok, karet hisap, labu takar 25 dan 50 ml, spektrofotometer, laptop untuk mengolah data, kamera untuk merekam kendaraan yang melintas dalam 4 jam pengamatan, dan perangkat lunak AERMOD, dan WRPLOT View untuk membuat mawar angin (*wind rose*) yang dibuat oleh Lakes Environmental.

Metode Pengambilan Sampel

Agustini dan Sudarno (2019) serta Pratomo (2019) menjelaskan langkah-langkah pengambilan SO_2 di lapangan dan analisis kandungan di dalam udara SO_2 dihitung dengan Persamaan (4).

$$K = \frac{X - V_{\text{Impinger}}}{V_{\text{Udara}}} \times 1.000 \dots \dots \dots (4)$$

Keterangan:

K = kadar SO_2 di udara ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);

X = Kadar SO_2 di dalam impinger ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);

V_{Impinger} = volume impinger (mL);

V_{Udara} = Volume udara (L).

1. Pengambilan Sampel SO₂

- Ambil penyerap SO₂ sebanyak 10 mL dimasukkan ke dalam tabung impinger.
- Tabung impinger dipasang pada peralatan pengukuran kualitas udara sesuai dengan nomor yang tertera,
- Hubungkan slang penghubung pipa dengan tabung impingernya, pastikan tidak ada kebocoran.
- Masukkan rangkaian itu ke dalam kotak pompa penghisap dan hubungkan selang penghubungnya.
- Selang yang ada corongnya dikeluarkan, corong menghadap ke bawah.
- Kotak ditutup dan dihidupkan pompa penghisapnya.
- Biarkan selama 60 menit.
- Setelah sesuai waktu ambil tabung impinger untuk segera dianalisa di laboratorium.

2. Pengukuran Konsentrasi SO₂

- Larutan dari tabung *midged impinger*, dituang ke dalam labu takar 25 mL.
- Tabung *midged impinger* di isi 4 ml *aquadest*, dimasukkan ke labu takar juga.
- Tambahkan 1 mL asam sulfonat 0,6%, biarkan selama 10 menit.
- Tambahkan 0,2 mL *formaldehyde* 0,2%.
- Tambahkan 5 mL larutan sediaan pararosanilin.
- Tambahkan aquades hingga tanda batas, diamkan 30 menit.
- Ukur warna yang terjadi dengan spektrofotometer pada λ 575 nm sebagai Y.

Pengukuran Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas atau yang bisa disebut juga dengan frekuensi kendaraan yang melintas di titik pengamatan adalah jumlah dan jenis kendaraan yang melintasi lokasi penelitian dan direkam dengan menggunakan kamera selama 4 jam periode pengamatan setiap harinya pada jam-jam sibuk 10:00-14:00 wib, yang berlangsung selama 2 hari. Kemudian dari hasil rekaman dihitung dan dipilah jumlah serta jenis kendaraan yang melintas di 4 titik pengamatan sebagai beban lalu lintas. Berdasarkan Faktor Emisi dari masing-masing kendaraan yang diambil dari Peraturan Menteri LH nomor 12 tahun 2010, maka kemudian akan dapat dihitung beban emisi maksimum di ruas jalan tersebut dengan panjang total 1 km. Dari empat titik pengamatan ini ditentukan beban emisi kendaraan bermotor yang paling tinggi (maksimum) untuk merepresentasikan beban emisi yang terjadi di daerah penelitian.

Pemodelan Dengan AERMOD

Pemodelan sebaran konsentrasi SO₂ di Kawasan Titik Nol Yogyakarta meliputi penentuan konsentrasi polutan di beberapa titik dan pembuatan peta sebaran polutan. Perhitungan konsentrasi di beberapa titik penerima didasarkan oleh tingkat emisi yang dihasilkan oleh

setiap kendaraan yang melintas, selanjutnya nilai konsentrasi pada titik penerima yang sama diakumulasikan. Menurut Rahmadhani *et al.* (2017) tahapan pemodelan sebaran polutan udara dengan perangkat lunak AERMOD meliputi:

- Perhitungan beban emisi yang berasal dari emisi.
- Mengevaluasi pengaruh meteorologi terhadap proses penyebaran senyawa pencemar di atmosfer. Proses sebaran dipengaruhi oleh keadaan awan, arah dan kecepatan angin, serta suhu lingkungan.
- Penentuan stabilitas ditentukan berdasarkan tabel kriteria stability class menurut Pasquill-Gifford yang didasarkan pada kecepatan angin dan radiasi sinar matahari atau tutupan awan.
- Hasil pengukuran konsentrasi SO_2 , kelembaban udara, tekanan udara, arah angin, dan kecepatan angin yang telah didapatkan kemudian dimodelkan menggunakan perangkat lunak AERMOD. Pengolahan data menggunakan AERMOD berdasarkan data hasil perhitungan konsentrasi dan peta wilayah. Hasil prediksi yang didapatkan dari pemodelan AERMOD kemudian dianalisis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada saat pengamatan titik A kondisi lalu lintas mengalami kemacetan yang disebabkan oleh pekerjaan pembangunan drainase menggunakan alat berat serta adanya revitalisasi trotoar di sepanjang Jalan KH. Ahmad Dahlan. Keadaan cuaca langit mendung, panas, dan berawan. Suasana ramai lancar terlihat pada titik B dengan cuaca cerah berawan. Pada Titik C cuaca saat penelitian cukup cerah. Titik D lokasi adalah pemukiman penduduk, sehingga terpantau lalu lintas sepi dan jalanan mayoritas dilalui kendaraan roda dua.

1. Jenis Dan Jumlah Kendaraan Bermotor Yang Melintas

Pada Tabel 3 disajikan data jumlah kendaraan bermotor yang melintasi keempat lokasi pengambilan sample. Data unit tidak bermotor seperti pengendara sepeda, pejalan kaki, becak sepeda/kayuh, dan andong tidak diperhitungkan di dalam penelitian ini.

Tabel 3. Jenis dan Jumlah Kendaraan Bermotor Yang Melintas selama Pengamatan 4 jam

Jenis Kendaraan	Hari Pertama (unit)			Hari Kedua (unit)			
	Titik A	Titik B	Titik C	Titik A	Titik B	Titik C	Titik D
Mobil (bensin)	728	633	802	360	566	906	13
Mobil (solar)	118	60	82	48	44	64	3
Sepeda Motor	3162	2101	3014	1662	2036	3471	407
Bis	17	21	7	7	10	8	0
Truk	66	24	23	12	5	18	0
Roda Tiga	17	9	18	18	12	16	20
Total	4108	2848	3946	2107	2673	4483	443
Rerata*	3107,5	2760,5	4214,5				

Keterangan: * = adalah rerata dari dua hari pengukuran, masing-masing 4 jam pada masing-masing titik pengamatan

Data di dalam Tabel 3 menunjukkan bahwa jumlah kendaraan bermotor yang melintasi Titik C yaitu Jalan Sultan Agung di Barat Jembatan Sayidan di hari pertama dan kedua adalah sebanyak 3946 dan 4483. Ini adalah jumlah atau frekuensi yang paling tinggi jika dibandingkan dengan titik-titik pengamatan lainnya. Pada Titik A di Jalan KH. Ahmad Dahlan sebanyak 4108 dan 2107, dan di titik B di Jalan Panembahan Senopati mencapai 2848 dan 2673, sedangkan di titik D atau di Jalan Nyai Ahmad Dahlan tercatat sebanyak 443 unit kendaraan yang melintas selama periode pengamatan.

Dari jenis kendaraan bermotor, sepeda motor paling mendominasi jumlah unit di setiap titik-titik pengamatan dengan nilai rata-rata sebesar 78,8%. Dominasi sepeda motor terjadi di titik D yaitu sebesar 91,9% dan paling rendah di titik B di hari pertama sebesar 73,8%. Seperti diketahui, titik D merupakan jalan kecil yang tidak bisa dilewati kendaraan besar/berat yang merupakan jalan perkampungan biasa sehingga lalu lintas di jalan itu lebih banyak dilakukan dengan menggunakan sepeda motor.

2. Laju Emisi

Hasil perhitungan laju emisi dalam setahun menggunakan Persamaan 3 dengan memanfaatkan hasil perhitungan beban emisi di dalam Persamaan 2. Perhitungan laju emisi setiap jenis kendaraan di masing-masing titik pengamatan selama setahun disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Laju Emisi dalam Setahun pada Masing-Masing Titik Pengamatan

Jenis Kendaraan	Laju Emisi SO ₂ Setahun (kg)			
	Titik A	Titik B	Titik C	Titik D
Mobil (bensin)	31.06	34.23	48.76	0.74
Mobil (solar)	80.20	50.24	70.54	2.90
Sepeda Motor	42.37	36.34	56.96	7.15
Bis	24.51	31.66	15.32	0
Truk	70.23	26.11	36.91	0
Bentor (Roda Tiga)	5.00	3.00	4.85	5.71
Total	253.36	181.58	233.34	16.50

Besarnya laju emisi tidak selalu berbanding lurus dengan banyaknya kendaraan yang melewati lokasi di sekitar Titik Nol Yogyakarta. Dari Tabel 3 diketahui jika frekuensi kendaraan bermotor paling tinggi terjadi di titik pengamatan C, yaitu rata-rata sebesar 4214,5 unit kendaraan bermotor selama 4 jam pengamatan. Angka ini 35,6% lebih tinggi daripada frekuensi kendaraan bermotor di titik pengamatan A yaitu 3107,5 unit kendaraan bermotor selama 4 jam. Perhitungan laju emisi tidak hanya ditentukan oleh frekuensi kendaraan bermotor tetapi juga jenis kendaraan bermotor karena jenis kendaraan bermotor ini memiliki faktor emisi sendiri-sendiri seperti yang telah disajikan di dalam Tabel 2.

Titik A yang berada di Jalan KH. Ahmad Dahlan memiliki frekuensi moda transportasi dengan bahan bakar solar seperti truk dan bis. Solar memiliki faktor emisi SO₂ yang jauh lebih besar dari pada bensin, jadi walaupun lebih banyak kendaraan berbahan

bakar bensin di titik ini, laju emisinya lebih besar kontribusinya dari moda transportasi berbahan bakar solar. Titik A posisinya berada di persimpangan terminal transit Trans Yogyakarta, terminal Ngabean, sehingga frekuensi bis cukup tinggi di daerah ini. Titik ini juga posisinya relatif di luar pusat kota dan dekat dengan pasar dan pinggiran kota mengarah ke Kabupaten Kulon Progo sehingga diduga kontribusi truk-truk pembawa barang juga bisa ditemukan.

3. Beban Emisi

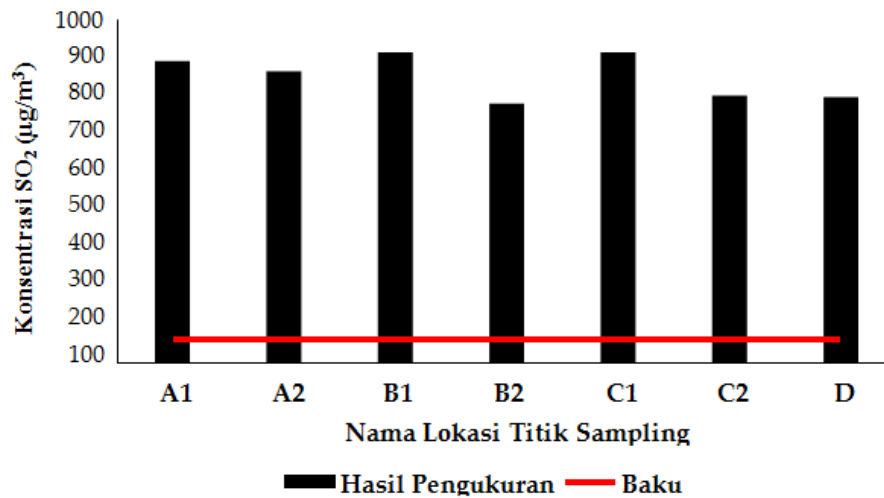
Perhitungan beban emisi pada hari ke-1 dan hari ke-2 di titik A, B, dan C, serta D diawali dengan pengukuran jumlah kendaraan yang melintas di titik-titik di atas selama 4 jam *sampling period* (Tabel 3). Di setiap titik pengamatan dihitung laju emisinya seperti yang telah disajikan di dalam Tabel 4. Pada tabel ini dapat dilihat bahwa beban emisi SO₂ maksimum di dalam daerah penelitian sebesar 253,36 kg/tahun sedangkan di daerah kontrol yang sangat minimal dilewati kendaraan bermotor beban emisi SO₂ – nya sebesar 16,50 kg/tahun atau sekitar 15 kali lebih rendah dari beban emisi maksimum.

Dari berbagai jenis kendaraan, di dalam penelitian ini, ternyata mobil dengan bahan bakar solar merupakan kontributor beban emisi tertinggi, yaitu sebesar 80,20 kg/tahun atau sebesar 31,7% dari total beban emisi SO₂ selama setahun itu walaupun dari frekuensinya tidak paling tinggi namun pada peringkat ketiga setelah sepeda motor dan mobil dengan bahan bakar bensin.

Jika dilihat dari jenis bahan bakarnya, maka kontribusi kendaraan bermotor dengan bahan bakar solar dan bahan bakar bensin masing-masing sebesar 69,0% dan 31,0%. Pada penelitian ini kontribusi kendaraan bermotor berbahan bakar solar lebih kecil daripada penelitian yang dilakukan oleh Ita & Titik (2013) yaitu masing-masing sebesar 85% dan 15%. Kecilnya kontributor kendaraan bermotor berbahan bakar solar di dalam penelitian ini karena Titik Nol Kota Yogyakarta merupakan pusat Kota Yogyakarta dimana pusat pariwisata dan budaya berkumpul di tempat ini. Oleh sebab itu, kegiatan bisnis seperti pergudangan dan perdagangan besar yang biasanya menggunakan moda transportasi berbahan bakar solar tidak memasuki daerah ini. Mereka cenderung menghindari daerah ini karena lokasi kegiatan mereka kebanyakan berada di pinggiran Kota Yogyakarta dan menghindari kemacetan yang dapat dipastikan selalu terjadi di daerah ini.

4. Hasil Pengukuran Konsentrasi SO₂

Pengukuran konsentrasi SO₂ dilakukan di 4 (empat) titik sampling selama 1 jam dalam 2 hari pengamatan menggunakan impringer dan hasilnya digunakan untuk perhitungan konsentrasi SO₂ dengan menggunakan Persamaan (4). Hasil pengukuran dan perhitungannya disajikan di dalam Gambar 2 dengan mengombinasikan dengan Baku Mutu Ambien yang ditentukan oleh Pemerintah.



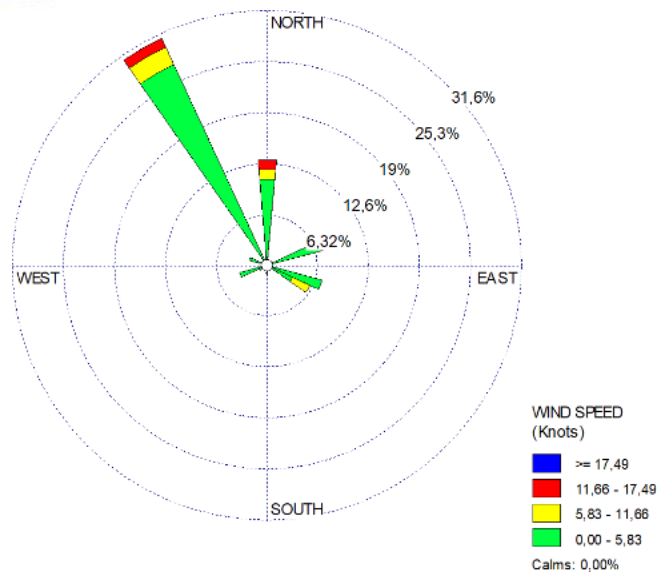
Gambar 2. Hasil Pengukuran dan Baku Mutu SO₂

Gambar 2 menunjukkan bahwa tingkat pencemar SO₂ pada 4 titik yang berbeda berada di atas ambang baku mutu berdasarkan Peraturan Pemerintah nomor 22 Tahun 2021, dimana konsentrasi maksimum gas SO₂ di udara ambien sebesar 150 µg/m³ untuk waktu pengukuran 1 jam. Gambar 2 menunjukkan bahwa konsentrasi SO₂ tertinggi pada hari pertama penelitian yaitu pada titik B dan C yakni sama sebesar 903,9 µg/m³, sedangkan kadar SO₂ terendah terdapat pada titik B yakni 779,9 µg/m³. Jalan KH. Ahmad Dahlan (titik A) dan Jalan Sultan Agung (titik C) di sebelah barat Jembatan Sayidan merupakan salah satu ruas jalan yang berfungsi sebagai jalan arteri sekunder. Pada saat pengukuran volume lalu lintas, kendaraan yang lewat tidak hanya kendaraan yang berukuran kecil, namun juga terdapat bus dan alat angkutan berat bermesin diesel dan berbahan bakar solar yang melintas di titik A dan C. Gas SO₂ yang dihasilkan dari kendaraan bermesin diesel sangat rendah jika dibandingkan dengan berbahan bakar bensin yaitu masing-masing sebesar 0,3% dan 99,7%.

Hasil pengukuran kadar gas SO₂ tertinggi pada hari kedua adalah 849,6 µg/m³ pada titik A, dan 778,8 µg/m³ pada pengukuran di titik C. Pada titik D kadar gas SO₂ yang terukur adalah 774,4 µg/m³, dimana lokasi ini aktivitas kendaraan bermotor cukup sepi dan berada di lokasi pemukiman penduduk sehingga pencemaran udara oleh SO₂ juga relatif kecil. Pengukuran sampel udara yang diperoleh di titik B 755,9 µg/m³, dimana lokasi tersebut adalah tempat parkir bus pariwisata. Namun pada saat pengambilan sampel dilakukan, tidak ada bus pariwisata yang parkir.

5. Arah Dan Kecepatan Angin

Kecepatan dan arah angin sangat berperan dalam penyebaran polutan di udara. Mawar angin (*windrose*) yang ditampilkan pada Gambar 3 menunjukkan bahwa arah angin dominan di Kawasan Titik Nol Yogyakarta adalah dari utara menuju selatan dan dari barat laut menuju tenggara, dengan kecepatan rata-rata 0,0-5,83 m/s selama masa pengamatan di lapangan.



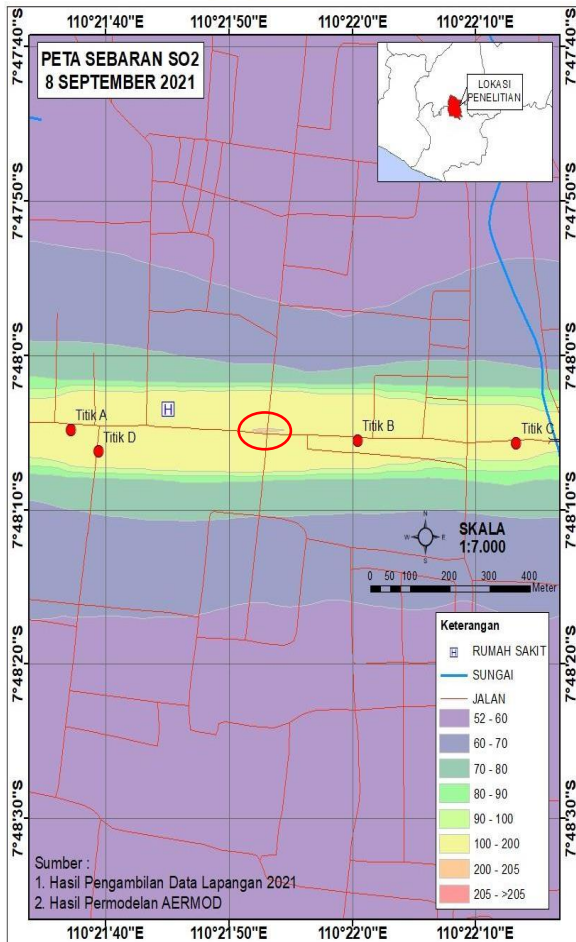
Gambar 3. Mawar Angin (Windrose) pada Titik Nol Yogyakarta

Hal ini dikarenakan Kota Yogyakarta adalah daerah dataran rendah di antara Samudera Hindia di sebelah selatan dan gunung Merapi di sebelah utara, sehingga arah angin dominan berasal dari utara menuju selatan, serta dari arah barat laut ke tenggara. Angin yang berhembus dengan cepat akan menyebabkan jarak persebaran polutan menjadi semakin jauh.

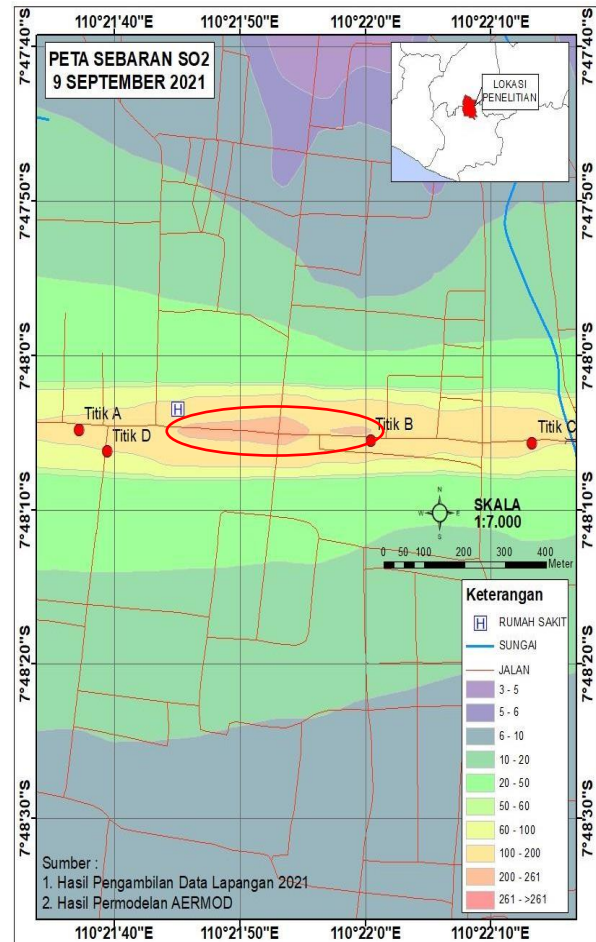
Di sisi lain, semakin kecil sudut datang angin terhadap jalan maka kecepatan angin semakin besar dan mengakibatkan pergerakan udara yang akan mengakibatkan penurunan konsentrasi SO_2 (Rehimi, 2013). Hasil yang sama juga diperoleh dari penelitian Venkatram *et al.* (2013) yang menyimpulkan bahwa pengaruh sudut datang angin cukup dominan terhadap konsentrasi karena terjadinya dispersi polutan sesuai dengan kemiringan sudut datang angin. Hal ini terjadi karena pada kecepatan angin yang besar akan mempercepat terjadinya penurunan konsentrasi SO_2 akibat adanya pergerakan udara maka terjadi suatu proses penyebaran gas SO_2 yang mengakibatkan penurunan konsentrasi SO_2 .

6. Hasil Pemodelan Dengan AERMOD

Gambar 4 dan Gambar 5 menampilkan hasil pemodelan sebaran polutan SO_2 di Kawasan Titik Nol Yogyakarta dari hasil pengamatan di lapangan selama 2 hari dengan menggunakan AERMOD.



Gambar 4. Hasil Pemodelan Hari Pertama



Gambar 5. Hasil Pemodelan Hari Kedua

Berdasarkan kedua gambar tersebut dapat dilihat bahwa sebaran nilai maksimum konsentrasi SO_2 berbeda-beda setiap harinya, dimana pada Gambar 4 nilai maksimum konsentrasi SO_2 selama 1 jam, sebesar $200 - 205 \mu\text{g}/\text{m}^3$ terlihat sangat kecil di Titik Nol Kota Yogyakarta. Sedangkan pada Gambar 5 yang merupakan hasil pengukuran di hari kedua sebaran konsentrasi SO_2 tampak hingga $>205 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berada di sekitar Titik Nol Kota Yogyakarta dan Titik B.

Kedua gambar menunjukkan bahwa arah sebaran polutan SO_2 ternyata tidak sesuai dengan arah dominan *windrose* yakni dari arah utara, dimana semestinya emisi dari Kawasan Titik Nol akan menyebar menuju sisi sebelah selatan dan konsentrasi tertinggi polutan berada di sisi selatan Kawasan Titik Nol. Hal ini terjadi dimungkinkan karena sepanjang jalan dimana ambien diukur terdapat bangunan/gedung-gedung yang tingginya lebih dari 3 meter sehingga membatasi pergerakan emisi. Karena pembatasan oleh gedung-gedung ini maka emisi “terpaksa” menyebar mengikuti “lorong” ruang terbuka berupa jalan. Meskipun konsentrasi maksimum tiap hari berbeda-beda, namun letak konsentrasi maksimum tiap jam selalu sama yakni terletak pada koordinat $7^\circ 48' 0'' \text{S}$ dan $110^\circ 21' 53'' \text{E}$. Penjelasan yang mungkin dari kondisi ini adalah daerah yang terletak di sebelah utara dari

titik pengamatan, yakni Kawasan Malioboro dan jalan Bayangkara adalah daerah dengan arus lalu lintas yang sangat padat, dan polutan yang berasal dari kawasan tersebut menyebar ke arah selatan hingga mencapai sisi selatan dari Kawasan Titik Nol.

Kedua sebaran pada Gambar 4 dan 5 juga menunjukkan fluktuasi dari konsentrasi SO_2 selama 1 jam dengan pola yang tidak jauh berbeda. Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa emisi yang keluar dari knalpot langsung terdispersi sehingga mengalami penurunan konsentrasi SO_2 kemudian terus meningkat hingga mencapai konsentrasi maksimum 200-205 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Konsentrasi SO_2 kembali mengalami penurunan dengan perlahan hingga konsentrasi relatif statis yakni sebesar 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berada pada jarak 342,2 m – 362,4 m, setelah itu konsentrasi SO_2 terus mengalami penurunan rata-rata sebesar 0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sehingga pada jarak 1.000 m dari titik pengamatan konsentrasi SO_2 menjadi 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Gambar 5 juga memiliki pola yang tidak berbeda dari pola sebelumnya. Konsentrasi SO_2 semakin menurun akibat emisi yang terus mengalami dispersi. Konsentrasi maksimum selama 1 jam sebesar 261 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ kemudian menurun secara perlahan dan relatif statis sebesar 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ di jarak 350,8 m – 360,8 m. Setelah itu konsentrasi SO_2 terus mengalami penurunan rata-rata sebesar 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sehingga pada jarak 1.000 m konsentrasi SO_2 menjadi sebesar 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pemodelan selama 24 jam juga menunjukkan bahwa konsentrasi maksimum sebesar 4,68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tidak melampaui baku mutu udara ambien yang telah ditetapkan sebesar 75 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ (24 jam) (PP RI nomor 22 tahun 2021). Adapun nilai maksimum yang ditunjukkan Gambar 4 dan 5 selama 2 hari berturut-turut sebesar 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dan 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

SIMPULAN

Tingkat pencemaran SO_2 di ambien sekitar Titik Nol Yogyakarta melebihi ambang batas baku mutu yang telah ditentukan oleh Pemerintah.

Perhitungan jumlah kendaraan bermotor atau frekuensi yang paling tinggi pada satu titik pengamatan tidak selalu menghasilkan laju emisi tahunan yang paling tinggi juga karena penentuan laju emisi tidak hanya ditentukan oleh frekuensi jumlah kendaraan tetapi juga faktor emisi dari masing-masing jenis kendaraan bermotor.

Berdasarkan pemodelan menggunakan *software* AERMOD dan *windrose*, polutan SO_2 diprediksi menyebar sejauh 100 m sampai dengan 600 m ke arah timur dari sumber emisi karena mengikuti jalur jalan yang ada karena ada penghalang di sisi utara dan selatan berupa bangunan/gedung.

DAFTAR PUSTAKA

Afzali, A., Rashid, M., Afzali, M., & Younesi, V. (2017). Prediction Of Air Pollutants Concentrations From Multiple Sources Using Aermod Coupled With Wrf Prognostic Model. *Journal Of Cleaner Production*, 166, 1216–1225. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.196>

Astrieia, A., & Budiyono, N. R. (2020). Persepsi Wisatawan Terhadap Citra Kepariwisata

- Di Kawasan Titik Nol Yogyakarta Yogyakarta Pasca Revitalisasi. *Jurnal Destinasi Pariwisata*, 8(2), 329. <https://doi.org/10.24843/Jdepar.2020.V08.I02.P22>
- Aviantara, D. B., & Suciati, F. (2021). Penggunaan Model Matematik Gaussian Dispersion Untuk Pendugaan Perubahan Kualitas Udara Dalam Analisis Dampak Lingkungan. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 14(1). <https://doi.org/10.29122/Jrl.V14i1.4914>
- Damara, D. Y., Wardhana, I. W., & Sutrisno, E. (2017). Analisis Dampak Kualitas Udara Karbon Monoksida Akibat Kegiatan Car Free Day Menggunakan Program Caline4 Dan Surfer. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 6(1), 1–14.
- Fawwaz, G. M. (2017). Studi Dispersi Emisi Karbon Monoksida Oleh Pesawat Komersil Dari Sumber Garis (Line Source) Di Bandara Internasional Juanda.
- Gusrianti, D., & Tarigan, A. P. M. (2017). Metode Finite Length Line Source Berbasis Analysis Of Carbon Monoxide Dispersion From Transportation At Sisingamangaraja Street Using Finite Length Line Source Method. *Jurnal Dampak*, 14(1): 41. DOI: <https://doi.org/10.25077/dampak.14.1.41-51.2017>
- Handriyono, R. E., & Kusuma, M. N. (2017). Estimasi Beban Emisi SO₂ Dan NO_x dari Kegiatan Industri di Karang Pilang Surabaya. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan V*. 2017. 19–24.
- Ismiyati, Marlita, D., & Saidah, D. (2014). Pencemaran Udara Akibat Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor. *Jurnal Manajemen Transportasi & Logistik (Jmtranslog)*, 01(03), 241–248.
- Ita Tetriana Agustini, Sudarno, T. I. (2019). Analisa Hubungan Jumlah Kendaraan Dan Faktor Meteorologi (Suhu, Kelembaban Udara Dan Kecepatan Angin) Terhadap Peningkatan Konsentrasi SO₂ Pada Persimpangan Jalan Kota Semarang. *Journal Of Chemical Information And Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Marlena, I. M., Huboyo, H. S., & Andarani, P. (2018). Inventarisasi Emisi Gas Pencemar Udara Beserta Estimasi Sebarannya Menggunakan Program Aermid Dan Caline4 Dari Sektor Domestik Dan Transportasi On Road Di Kota Semarang. 1–9.
- Natsir, T. A., Windrianto P, Y., Susetyaningsih, R., Setyanto, K., & Dewi, R. (2018). Simulasi Dampak Pencemaran Udara Karbon Monoksida Di Kota Yogyakarta Akibat Emisi Kendaraan Bermotor (Simulation Of Carbon Monoxide Pollution Effect In Yogyakarta City Caused By The Emission Of Motor Vehicles). *Jurnal Manusia Dan Lingkungan*, 24(1), 11. <https://doi.org/10.22146/Jml.23631>
- Nayeb Yazdi, M., Arhami, M., Delavarrafiee, M., & Ketabchy, M. (2016). Modeling Of Cement Faktory Air Pollution Dispersion By Aermid. *Proceeding Of 109th Air And Waste Management Association Annual Conference And Exhibition.*, June 2016, 2230.
- Pratomo, S. A. (2019). Penentuan Kadar Sulfur Dioksida (SO₂), Nitrogen Dioksida (NO₂),

Oksidan (O_3), Dan Ammonia (NH_3) Pada Udara Ambien Di Balai Hiperkes Dan Keselamatan Kerja Yogyakarta. 2.

- Putri, D. K., Islam, P., Publik, K., & Kalijaga, U. I. N. S. (2019). Kawasan Titik Nol Yogyakarta Yogyakarta Sebagai Ruang Publik Dalam Perspektif Kritik Postkolonial. 12, 33–45.
- Putri, G. K. (2017). Analisis Konsentrasi Pencemar SO_2 Dan NO_2 Dari Kegiatan Transportasi Dengan Pendekatan Model Delhi Finite Line Source (Dfls) (Studi Kasus: Jalan Gatot Subroto Kota Medan). Universitas Sumatera Utara.
- Rahmadhani, A., Assomadi, A. F., & Hermana, J. (2017). Pemodelan Dispersi Debu Industri Semen Di Kabupaten Tuban Jawa Timur. Jurnal Teknik ITS, 6(2). <https://doi.org/10.12962/J23373539.V6i2.23879>
- Seangkiatiyuth, K., Surapipith, V., Tantrakarnapa, K., & Lothongkum, A. W. (2011). Application Of The Aermod Modeling System For Environmental Impact Assessment Of No 2 Emissions From A Cement Complex. In Journal Of Environmental Sciences (Vol. 23, Issue 6). The Research Centre For Eco- Environmental Sciences, Chinese Academy Of Sciences. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60499-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60499-8)
- Shaikh, K., Imran, U., & Shaikh, S. (2018). Health Risk Assessment For Emissions From Jamshoro Thermal Power Station Using Aermod Dispersion Model. J Ind Pollut Control, 34(2), 2142–2151.
- Tangga, R., Kelurahan, D. I., Balok, P. D. A. N., & Kendal, K. (2015). Analisis Emisi CO_2 Antropogenik Rumah Tangga Di Kelurahan Patukangan, Pekauman Dan Balok, Kabupaten Kendal. Indonesian Journal Of Conservation, 4(1), 45–51.