Analisis Dispersi Ozon (O_3) Udara Ambien di Kawasan Budaya, Kota Yogyakarta Menggunakan AERMOD

Muhammad Galung Al Samoud[1], Noviani Ima Wantoputri[1], Ana Uswatun Hasanah[1,2]

[1] Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana, Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55584
[2] Laboratorium Kualitas Udara, Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55584

*Korespondensi: galungalsamoud@gmail.com

Abstrak. Pertumbuhan jumlah penduduk di Kota Yogyakarta menunjukkan tren yang signifikan dan diiringi dengan peningkatan aktivitas kendaraan bermotor, terutama di kawasan budaya. Kondisi ini berdampak pada penurunan kualitas udara, salah satunya ditunjukkan oleh meningkatnya konsentrasi ozon (O_3). Penelitian ini bertujuan untuk menghitung nilai beban emisi perkusor ozon (O_3), mengukur secara aktual polutan ozon (O_3) menggunakan instrumen impinger, dan memodelkan pola dispersi ozon (O_3) menggunakan perangkat lunak AERMOD. Inventarisasi emisi dilakukan pada 10 ruas jalan yang menjadi lokasi penelitian dengan menggunakan data volume kendaraan dan karakteristik jalan. Hasil perhitungan dari beban emisi perkusor yaitu NO_x dan CO menunjukkan bahwa beban emisi ozon (O_3) tertinggi terdapat pada Jalan Brigjen Katamso, yaitu sebesar 21,639 gram/detik. Konsentrasi ozon (O_3) aktual yang diukur menunjukkan nilai 18,73 µg/m³ dan 22,63 µg/m³ pada dua titik pengamatan di Jalan Bantul dan Jalan DI Panjaitan, sedangkan hasil pemodelan menunjukkan konsentrasi sebesar 27,18 µg/m³ dan 53,01 µg/m³ pada kedua titik yg mendekati titik aktual pengujian. Pola dispersi ozon (O_3) sejalan dengan arah angin dominan menuju tenggara dengan kecepatan rata-rata 1,91 m/s. Hasil validasi model menunjukkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 24,45 µg/m³, yang merepresentasikan adanya deviasi yang masih cukup tinggi antara hasil pengukuran dan pemodelan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan dengan jumlah titik pengambilan sampel yang lebih banyak serta pengaturan waktu pengambilan data yang lebih tepat untuk memperoleh hasil yang lebih akurat dan representatif.

Kata Kunci: AERMOD, dispersi model, emisi kendaraan, ozon

1. PENDAHULUAN

Udara ambien adalah udara bebas di permukaan bumi pada lapisan troposfer yang berada di dalam wilayah yurisdiksi Republik Indonesia yang dibutuhkan dan berpengaruh terhadap kesehatan manusia, makhluk hidup, dan unsur Lingkungan Hidup lainnya. Pertumbuhan penduduk yang begitu signifikan serta banyak masyarakat dari berbagai kalangan yang datang ke Yogyakarta menimbulkan permasalahan lingkungan. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), laju pertumbuhan penduduk Kota Jogja pada tahun 2021 meningkat signifikan sebesar 0,98 persen dari 0,93 persen pada tahun sebelumnya. Seiring dengan pertumbuhan dan pembangunan infrastruktur dalam sektor industri maupun transportasi yang semakin meningkat, menyebabkan perubahan pencemar ke atmosfer berupa gas atau parikulat (Indra et al., 2024)

Udara dapat dikatakan tercemar apabila terdapat perubahan pada proporsi mulanya, perubahan dapat terjadi disebabkan zat pencemar yag terlepas ke udara oleh aktivitas alam atau manusia seperti gas buang cerobong asap dan kendaraan bermesin (Silo et al., 2019). Salah satu kadar konsentrasi di udara adalah nitrogen dioksida (NO_2) dan Ozon (O_3), kedua polutan tersebut merupakan polutan utama yang memiliki dampak secara nyata dan berkaitan terhadap kesehatan manusia (Platikanov et al., 2022). Dalam aktivitasnya di luar ruangan polutan O_3 tentunya menjadi aspek utama terkait dampaknya bagi lingkungan. O_3 di troposfer berasal dari perpindahan dari stratosfer serta pembentukannya dari bebagai reaksi fotokimia antara karbon monoksida (CO), VOC, dan nitrogen oksida (NOx) serta faktor meteorologi seperti suhu yang tinggi, radiasi matahari, dan curah hujan menjadi faktor pendukung lainnya (Otero et al., 2016) dalam (Platikanov et al., 2022).

Pencemaran udara yang dihasilkan salah satunya berasal dari emisi kendaraan bermotor yang melintas di kawasan wisata kebudayaan di Yogyakarta. Kurangnya pemantauan udara serta stasiun pemantauan kualitas udara di Kota Yogyakarta menjadi suatu hal yang perlu diperhatikan. Terbatasnya data yang tersedia menyebabkan penelitian mengenai sistem pendukung keputusan untuk menangani tingkat pencemaran udara di Yogyakarta masih menjadi sangat terbatas (Dwiki Likuisa, 2019). Pemantauan kualitas udara di Yogyakarta terutama di sekitar kawasan budaya Kota Yogyakarta terutama Jalan Bantul dan Jalan DI Panjaitan yang belum optimal maka dibutuhkan penelitian lanjutan dalam mengetahui tingkat pencemaran udara di kawasan tersebut.

Analisis dan pemodelan polutan udara menjadi hal penting untuk mengetahui dari dampak aktivitas manusia yang berkelanjutan bagi lingkungan serta masyarakat (Platikanov et al., 2022). Salah satu metode yang dapat digunakan adalah menggunakan Software Air Dispersion Modelling atau pemodelan AERMOD. Penelitian ini memiliki tujuan untuk menganalisis persebaran polutan ozon (O_3) yang disebabkan berbagai aktivitas di sekitar kawasan budaya di Kota Yogyakarta terkhusus aktivitas transportasi. Selain itu penelitian ini juga untuk mengetahui dan memperoleh hasil berupa peta pemodelan. Sehingga pemodelan AERMOD dapat memetakan persebaran polutan O_3 secara realistis dan dapat memberikan suatu gambaran yang jelas mengenai persebaran polutan O_3 terhadap lingkungan sekitar.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian akan dilakukan beberapa tahapan dari persiapan larutan hingga melakukan analisis hasil uji di laboratorium dan analisis data, dengan dengan waktu penelitian selama kurun waktu 1 bulan yaitu pada Bulan Januari 2025 sampai dengan Bulan Februari 2025.

2.1 Pengumpulan Data

Data primer sendiri nantinya berupa sampel uji langsung konsentrasi O_3 dan data volume lalu lintas kendaraan. Kemudian data sekunder berupa data meteorologi dan data elevasi serta tata guna lahan. Pengambilan sampel dilakukan berdasarkan SNI 19-7119.8-2017 tentang cara uji kadar oksidan dengan metode *neutral buffer kalium iodida* (NBKI). Berikut merupakan kebutuhan dalam pengambilan sampel atau data.

Tabel 1. Pengumpulan data primer dan sekunder

No	Kegiatan	Parameter	Alat dan Bahan
1	Inventarisasi Emisi	Volume kendaraan	Microsoft Excel, QGIS
		Faktor emisi kendaraan kategori bahan bakar	Microsoft Excel
		Koordinat jalan, lebar jalan, dan panjang jalan	Microsoft Excel, QGIS, AERMOD
2	Pengukuran Kualitas Udara Ambien	Kadar Ozon (O_3) (Impinger)	Alat: Labu ukur 100 mL, 500 mL, 1000 mL; pipet volumentrik; gelas ukur 100 mL; gelas piala 100 mL dan 1000 mL; tabung uji 10 mL; spektrofotometer UV-Vis; neraca analitik; buret 50 mL; desikator; labu erlenmeyer; oven; thermometer; barometer. Bahan: larutan penjerap oksidan; larutan induk iod (I_2) 0,05 N; larutan asam klorida (HCl); larutan natrium tiosulfat; hablur kalium iodat ($Na_2S_2O_3$); asam klorida (HCl pekat) 37%; hablur kalium iodida (KI); larutan indikator kanji.
3	Pemodelan Dispresi Pencemaran Udara	Parameter meteorologis (elevasi, anemometer *height,* arah dan kecepatan angin, suhu, kelembapan, tekanan, presipitasi, radiasi, dan *cloud cover*).	Microsoft Excel, WRPLOT, AERMET, ODV
		Peta tata guna lahan	AERMAP
		Peta kontur permukaan (*terrain)*	AERMAP
4	Uji Validasi Model	Uji korelasi	Microsoft Excel

2.2. Analisis Data

Perhitungan konsentrasi polutan berdasarkan acuan SNI 19-7119.8-2017 tentang cara uji kadar oksidan dengan metode *neutral buffer kaliumiodida* (NBKI).

1. Volume contoh uji udara yang diambil
   Volume contoh uji udara yang diambil dikoreksi pada kondisi normal (25 °C, 760 mmHg) dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$V = \frac{F_1 \times F_2}{2} \times t \times \frac{P_a}{T_a} \times \frac{298}{760} \quad (1)$$

   di mana:
   V = volume udara yang dihisap dikoreksi pada kondisi normal 25 °C, 760 mmHg
   F_1 = laju alir awal (L/menit)
   F_2 = laju alir akhir (L/menit)
   t = durasi pengambilan contoh uji (menit)
   P_a = tekanan barometer rata-rata selama pengambilan contoh uji (mmHg)

T_a = temperatur rata-rata selama pengambilan contoh uji (°K)
298 = konversi temperatur pada kondisi normal (25 °C) ke dalam Kelvin
760 = tekanan udara standar (mmHg)

2. Kosentrasi oksidan di udara ambien
   Konsentrasi oksidan dalam contoh uji dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$C = \frac{a}{V} \times 1000 \quad (2)$$

Dimana:
C = konsentrasi oksidan di udara (µg/Nm^3)
A = jumlah oksidan dalam contoh uji yang diperoleh dari kurva kalibrasi (µg)
V = volume udara yang dihisap dikoreksi pada kondisi normal 25 °C, 760 mmH/g

Perhitungan beban emisi mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No 12 Tahun 2010. Menurut (Ersa et al., 2023), sumber emisi kendaraan dari jalan raya dapat dihitung menggunakan metode tier-1 dan tier-2, namun metode tier-2 dianggap lebih teliti disebabkan pertimbangan kategori kendaraan, jenis bahan bakar, dan jarak yang digunakan.

$$E = Jumlah\ Kendaraan\ x\ L\ x\ FE\ x\ 10^{-6} \quad (3)$$

di mana:
E = beban emisi (ton)
L = total panjang perjalanan yang diamati (km)
FE = faktor emisi Nasional (g/km/kendaraan)

Pemodelan sebaran konsentrasi O_3 yang diterapkan dalam penelitian ini adalah AERMOD. AERMOD sangat cocok digunakan di lokasi pengambilan sampel dengan kontur yang datar maupun rumit, baik di area pedesaan maupun perkotaan. Suhu, arah dan kecepatan angin adalah informasi meteorologi yang diperlukan untuk penggunaan AERMOD. AERMOD dipakai dan disarankan oleh Amerika Serikat. Badan Perlindungan Lingkungan AS (USEPA) mengantisipasi penyebaran bau berkat kinerjanya yang sangat efektif, khususnya dalam simulasi dengan jarak dekat. Ada beberapa langkah sub-program dalam proses pemodelan peta kontur kebauan dengan AERMOD. Dalam proses pemodelan ini, diperlukan pengolahan data meteorologi melalui AERMET dan persiapan kontur permukaan dengan AERMAP.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Kondisi Eksisting Penelitian

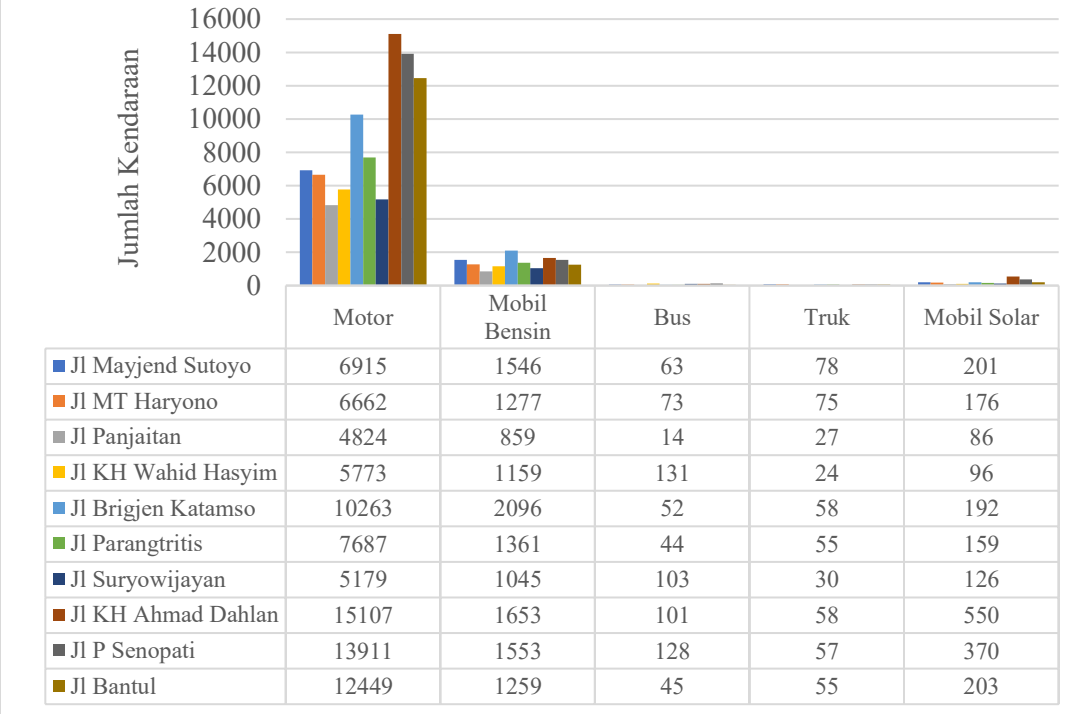
Pengambilan data primer dilakukan di dua titik, yaitu berada di Jalan Bantul dan Jalan DI Panjaitan. Tabel 2 menunjukkan data kondisi lapangan area penelitian pada pengambilan data primer.

3.2 Volume Kendaraan

Pengambilan data dilakukan selama tiga kurun waktu, yaitu pagi, siang, dan sore hari yang nantinya akan mengasumsikan besarnya konsentrasi pada satu hari (Iriani & Pribadi, 2023). Hasil pengukuran volume kendaraan ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.

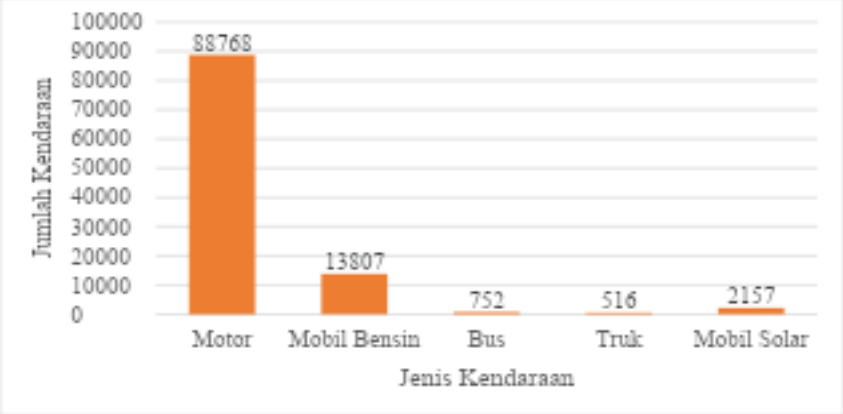
Tabel 2. Kondisi eksisting area penelitian

No	Titik Sampling	Dokumentasi	Kondisi Eksisting
1	Titik 1 Jalan Bantul (Depan Toko Ayo Gadai)		- Kondisi jalan baik - Lebar jalan 10 meter - Mempunyai 2 hingga 4 lajur jalan - Banyak bangunan - Terdapat pertigaan dan perempatan
2	Titik 2 Jalan DI Panjaitan (Depan Polsek Mantrijeron)		- Kondisi jalan baik - Lebar jalan 7 meter - Mempunyai 2 lajur jalan - Banyak bangunan - Terdapat perempatan



	Motor	Mobil Bensin	Bus	Truk	Mobil Solar
Jl Mayjend Sutoyo	6915	1546	63	78	201
Jl MT Haryono	6662	1277	73	75	176
Jl Panjaitan	4824	859	14	27	86
Jl KH Wahid Hasyim	5773	1159	131	24	96
Jl Brigjen Katamso	10263	2096	52	58	192
Jl Parangtritis	7687	1361	44	55	159
Jl Suryowijayan	5179	1045	103	30	126
Jl KH Ahmad Dahlan	15107	1653	101	58	550
Jl P Senopati	13911	1553	128	57	370
Jl Bantul	12449	1259	45	55	203

Gambar 1. Volume kendaraan pada tiap jalan



Gambar 2. Volume kendaraan tiap jenis kendaraan

Berdasarkan data yang disajikan dalam Gambar 1 dan Gambar 2, terdapat disparitas signifikan dalam volume lalu lintas berdasarkan jenis kendaraan. Sepeda motor mendominasi komposisi lalu lintas dengan jumlah mencapai 88.768 unit, secara substansial melebihi jenis kendaraan lain. Selanjutnya, kendaraan roda empat berbahan bakar bensin tercatat sebanyak 13.807 unit, menempati posisi kedua setelah sepeda motor. Sementara itu, kendaraan komersial seperti bus dan truk menunjukkan volume yang relatif rendah, masing-masing sebesar 752 dan 516 unit. Kendaraan mobil diesel tercatat sejumlah 2157 unit.

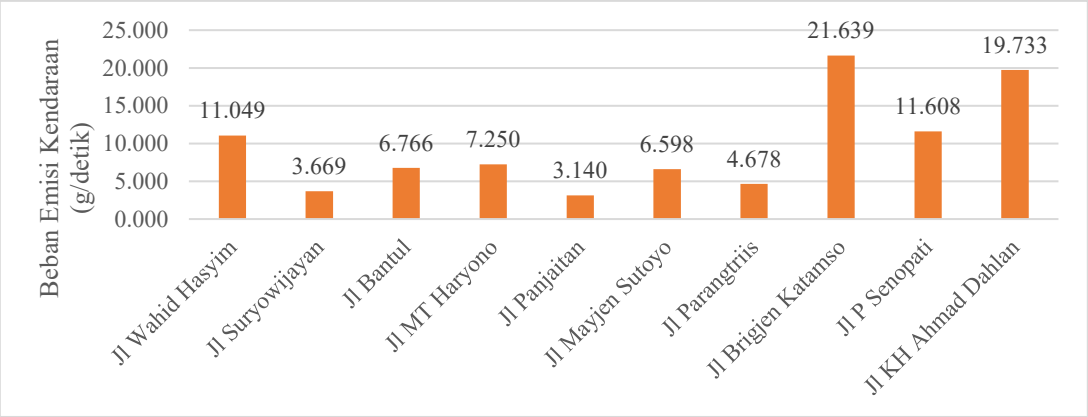
Dominasi kendaraan motor yang cukup tinggi dibandingkan dengan kendaraan lain mengindikasikan bahwa sepeda motor merupakan moda transportasi yang paling banyak digunakan oleh masyarakat di wilayah studi. Beberapa faktor yang mungkin berkontribusi terhadap hasil ini meliputi biaya operasional yang relatif rendah, kemampuan manuver atau berpindah yang tinggi dalam kondisi lalu lintas padat, serta aksesibilitas yang lebih baik dibandingkan dengan moda transportasi lainnya. Serta dengan pertimbangan banyaknya ruang publik di daerah penelitian ini, seperti pasar tradisional, alun-alun kota, rumah sakit, dan tempat publik lainya menjadikan faktor penggunaan lebih banyak digunakan karena faktor aksesibilitas yang lebih mudah.

3.3 Beban Emisi Ozon (O_3)

Dalam pembentukan ozon (O_3) atau source O_3 di troposfer, CO dan NO_x menjadi prekursor yang berperan penting dalam mekanisme tersebut (Qonitan, 2018). Prekusor ozon yaitu karbon monoksida, hidrokarbon, dan oksida nitrogen yang bersumber dari alam maupun aktivitas manusia mempengaruhi konsentrasi ozon troposfer, sehingga semakin tinggi emisi dari prekursor maka semakin tinggi konsentrasi ozon terbentuk (Ambarsari, 2015). Ozon permukaan terbentuk akibat reaksi oksidasi fotokimia antara karbon monoksida (CO) dan senyawa organik volatil (VOCs) yang terjadi di hadapan nitrogen oksida (Ambarsari et al., 2010). Pada persamaan reaksi yang berkaitan terhadap reaksi fotokimia, CO memiliki peranan penting dalam siklus pembentukan O3 terutama skala luas di atmosfer bebas, sedangkan VOCs memiliki peranan dalam skala lokal (Masdat et al., 2022).

Dalam penelitian ini diasumsikan secara sederhana dan mendekati kondisi perkiraan rata-rata kasar sebagai pendekatan awal. Hal ini digunakan karena keterbatasan data dalam penelitian ini, sehingga presentasi dalam pembentukan ozon (O_3) berasal dari karbon monoksida (CO) sebesar 20 % dan nitrogen oksida (NO_x) sebesar 70 %. Nitrogen oksida yang dihasilkan oleh bahan bakar

di jalan raya dan sumber solar di jalan raya menyalurkan lebih dari 50 % pembentukan O_3 di lokasi pemantauan, sehingga sektor transportasi menjadi sumber terbesar NO_x yang berperan dalam proses pembentukan O_3 (Zhao et al., 2022). Menurut National Research Council America tahun 1999 menyatakan bahwa sekitar 20 % ozon yang terbentuk di permukaan atmosfer berasal langsung dari emisi karbon monoksida (CO). Dalam persamaan reaksi yang berhubungan dengan reaksi fotokimia yang lambat, CO memiliki peranan penting dalam siklus pembentukan ozon (O_3) dalam skala luas di atmosfer bebas, sedangkan VOCs memiliki peranan penting dalam pembentuk ozon (O_3) dalam skala lokal (Masdat et al., 2022).



Gambar 3. Grafik nilai beban emisi kendaraan parameter ozon (O_3)

Berdasarkan Gambar 3, terlihat bahwa beban emisi kendaraan (dalam satuan gram per detik) bervariasi secara signifikan di antara sepuluh ruas jalan yang dianalisis. Jalan Brigjen Katamso menunjukkan nilai beban emisi tertinggi sebesar 21,639 g/detik, diikuti oleh Jalan KH Ahmad Dahlan dengan 19,733 g/detik dan Jalan Panembahan Senopati sebesar 11.608 g/detik. Sebaliknya, ruas jalan dengan emisi terendah terdapat pada Jalan Panjaitan dan Jalan Suryowijayan, masing-masing sebesar 3,140 g/detik dan 3,669 g/detik.

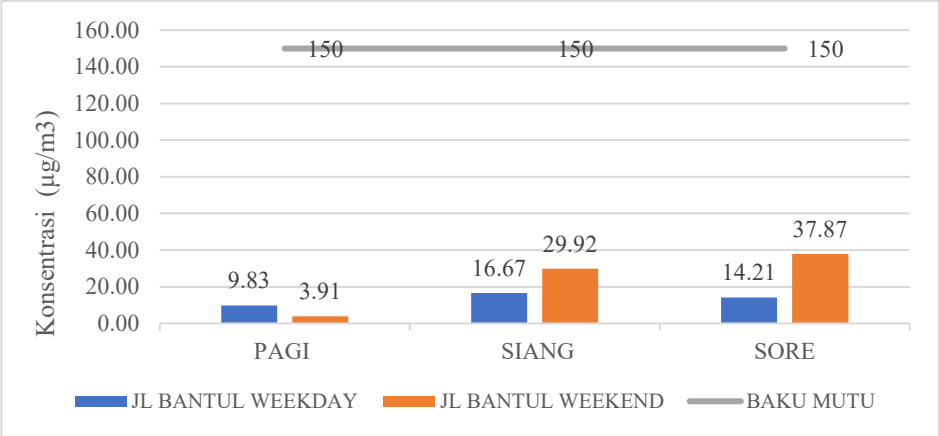
3.4 Konsentrasi Aktual Ozon (O_3)

3.4.1 Konsentrasi Ozon Jalan Bantul

Pengambilan sampel ozon (O_3) di Jalan Bantul dilakukan pada pada hari Sabtu (1 Februari 2025) untuk *weekend* dan hari Selasa (4 Februari 2025) untuk *weekday*. Pengambilan dilakukan selama satu jam untuk tiap sesi (pagi, siang, sore).

Hasil grafik (Gambar 2) untuk kedua waktu *weekday* dan *weekend* menunjukkan perbedaan tren yang cukup signifikan. Pada *weekday*, konsentrasi ozon (O_3) mengalami kenaikan dari sesi pagi ke sesi siang, namun mengalami penurunan dari sesi pagi ke sesi sore. Hal ini cukup sesuai ketika di sesi pagi menghasilkan konsentrasi ozon (O_3) yang terendah, mengingat sinar matahari belum sepenuhnya maksimal dibandingkan sesi siang dan sore. Kenaikan serta penurunan konsentrasi ozon (O_3) berhubungan dengan adanya proses fotokimia yang energinya bersumber dari sinar matahari (Sulistiyono et al., 2019). Selain itu, hal ini juga sejalan dengan kenaikan suhu permukaan dari pagi hari menuju siang hari seperti pada waktu *weekday*, suhu pagi sebesar 30,6°C meningkat hingga 35,25°C pada siang hari. Suhu yang lebih tinggi dan intensitas sinar matahari yang meningkat dapat mempercepat pembentukan O_3, sehingga kadar O_3 umumnya mencapai titik

tertinggi pada siang hari dan selama musim panas [(Mahidin et al., 2021) dalam (Gonzalez et al., 2024)]. Selain itu, yang mempengaruhi keadaan ini adalah cuaca yang cukup mendung di sesi pagi hari, meskipun pada waktu *weekday* volume kendaraan yang melintas tidak jauh berbeda.



Gambar 2. Grafik konsentrasi O_3 di Jalan Bantul

Berbeda pada waktu *weekend*, tren grafik yang dihasilkan menunjukkan kenaikan dari sesi pagi hingga sore hari. Sesi pagi memiliki nilai konsentrasi ozon (O_3) yang lebih kecil dibandingkan sesi pagi pada *weekday*. Selain dikarenakan faktor meteorologi, volume kendaraan yang lebih sedikit menjadi salah satu faktor yang menjadikan nilai konsentrasi ozon (O_3) lebih kecil di waktu tersebut. Volume kendaraan yang lebih sedikit dibandingkan sesi yang lain sejalan dengan waktu akhir pekan yang dimana pengguna jalan tidak melakukan aktivitas seperti hari kerja. Nilai konsentrasi ozon (O_3) pada sesi siang dan sore lebih tinggi dibandingkan pada saat *weekday* dapat memberikan asumsi bahwasannya pada akhir pekan aktivitas lalu lintas meningkat pada siang hingga sore hari.

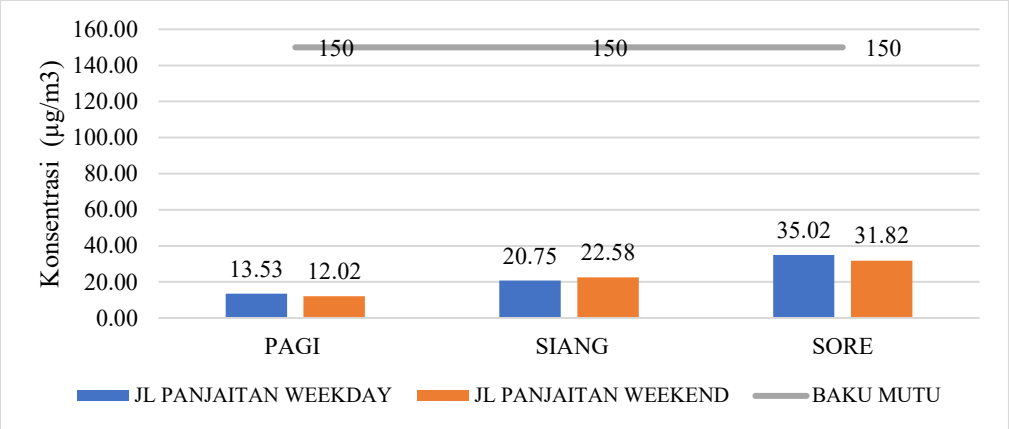
3.4.2 Konsentrasi Ozon Jalan DI Panjaitan

Pengambilan sampel gas ozon (O_3) di Jalan DI Panjaitan dilakukan pada dua waktu yaitu pada hari Minggu (2 Februari 2025) untuk *weekend* dan hari Kamis (30 Januari 2025) untuk *weekday*. Pengambilan dilakukan selama satu jam untuk tiap sesi (pagi, siang, sore).

Secara umum, grafik pada Gambar 5 menunjukkan konsentrasi ozon pada *weekend* lebih besar dibandingkan dengan *weekday* kecuali pada sesi waktu siang hari. Hal itu dikarenakan terjadi mendung dan gerimis kecil. Ozon terjadi karena adanya reaksi fotokimia antara senyawa organik dan nitrogen oksida dibawah sinar matahari (Masdat et al., 2022). Dengan adanya hujan yang dimana mendung atau awan yang menutupi permukaan bumi menjadikan pembentukan ozon menurun. Selain itu, hujan dapat mengencerkan konsentrasi polutan di atmosfer, ketika turun hujan, partikel dan gas yang terakumulasi di udara akan larut ke tanah dan mengurangi konsentrasi ozon (Yoo et al., 2014).

Penurunan ataupun peningkatan konsentrasi O_3 berkesesuaian disini dengan faktor radiasi matahari. Pengurangan konsentrasi O_3 berkaitan dengan berkurangnya intensitas radiasi matahari, dan selain pengaruh dari cahaya matahari yang rendah, aktivitas manusia juga berperan dalam proses terbentuknya O_3 (Masdat et al., 2022). Dikarenakan dari intensitas sinar matahari yang

rendah, aktivitas manusia menjadi berkurang. Hal ini menyebabkan penurunan emisi gas-gas prekursor ozon dari sektor transportasi dan sektor-sektor lain, sehingga konsentrasi ozon troposfer yang terbentuk juga menurun.

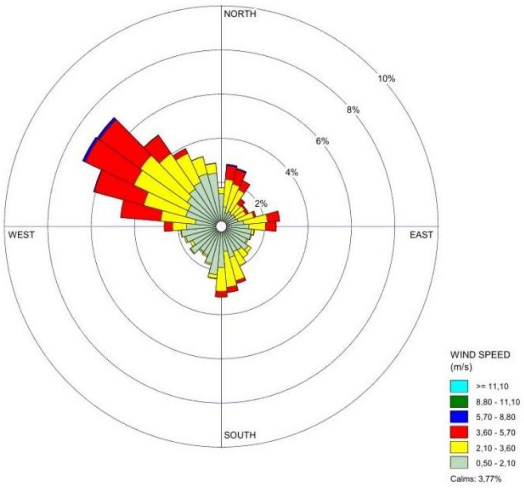


Gambar 5. Grafik Konsentrasi O_3 Jalan DI Panjaitan

3.5 Hasil Pemodelan AERMOD

3.5.1 Windrose

Data yang digunakan adalah data per jam selama 24 jam dari Bulan Februari 2024 hingga Bulan Januari 2025 atau selama 12 bulan. Peta windrose dihasilkan dari pengolahan data angin menggunakan WRPLOT view yang menunjukkan arah angin (blowing from dan blowing to) dan frekuensi distribusi kelas angin (wind class frequency distribution. Dari hasil pengolahan data meteorologi arah angin, diketahui bahwasannya arah angin bertiup secara dominan dari arah Barat Laut (Northwest) ke arah Tenggara (Southeast) dengan rata-rata kecepatan angin sebesar 1,91 m/s. Dari hasil tersebut angin dominan bertiup dari arah barat dan barat laut yang ditunjukkan dengan batang yang lebih panjang dan lebih dominan yang menandakan kecepatan moderat antara 3,60 – 5,70 m/s serta angin dengan kecepatan lebih tinggi (5,70 – 8,80 m/s) namun lebih sedikit.



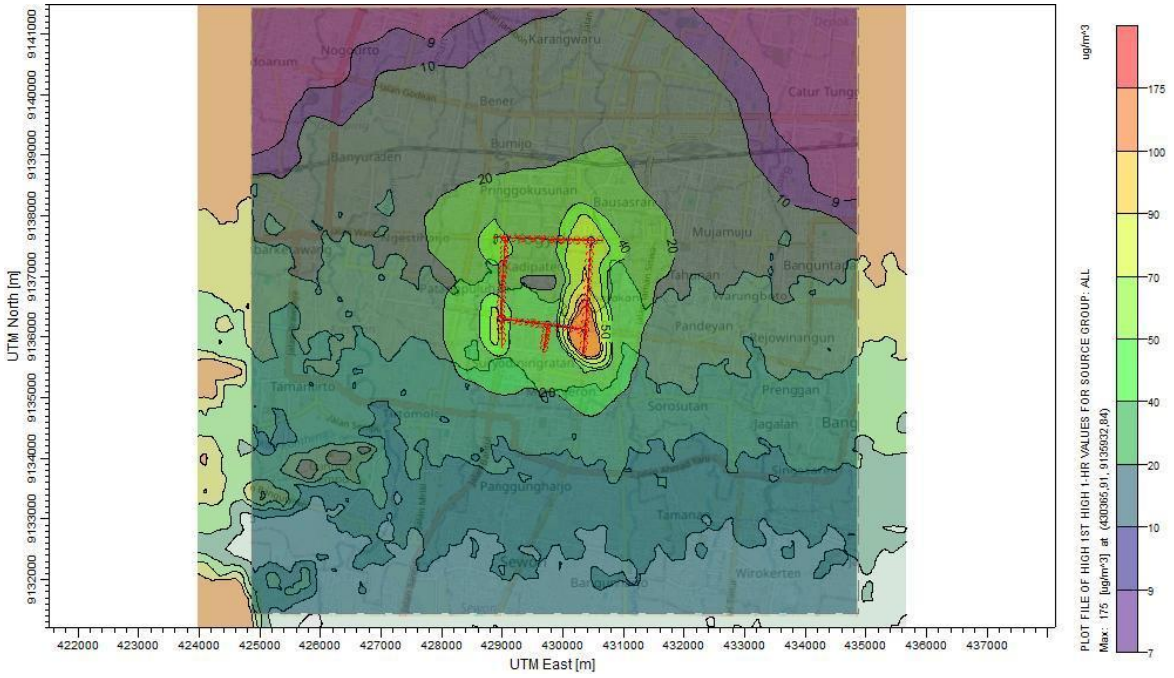
Gambar 6. Windrose (blowing from)

3.5.2 Sebaran Konsentrasi Ozon (O_3)

Hasil pemodelan sebaran emisi polutan gas ozon (O_3) dengan variasi waktu 1 jam dapat dilihat pada Gambar 7. Skala konsentrasi yang diilustrasikan menyesuaikan dengan baku mutu udara ambien pada Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, sesuai dengan yang tercantum dalam baku mutu udara ambien parameter O_3 yaitu selama 1 jam. Konsentrasi di dua titik pada Jalan Bantul dan Jalan DI Panjaitan ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Konsentrasi ozon (O_3) pada 2 titik penelitian

Area	Titik Koordinat		Konsentrasi ($\mu g/m^3$)
	X	Y	
Jl Bantul	428865,91	9136432,84	53,01
JL DI Panjaitan	429865,91	9136432,84	27,18

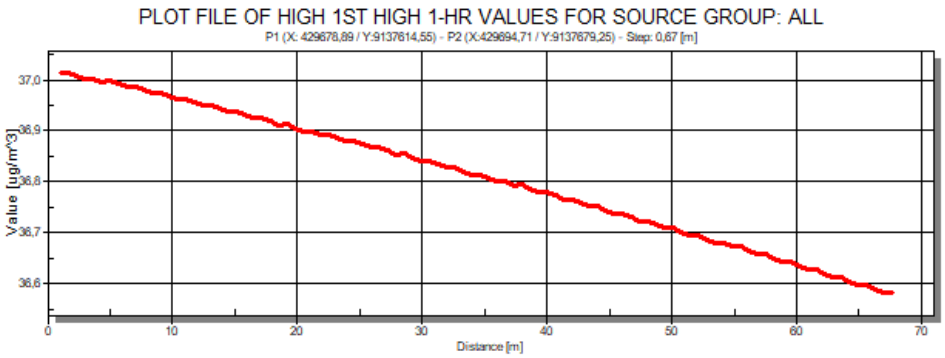


Gambar 7. Model sebaran ozon (O_3) periode 1 jam

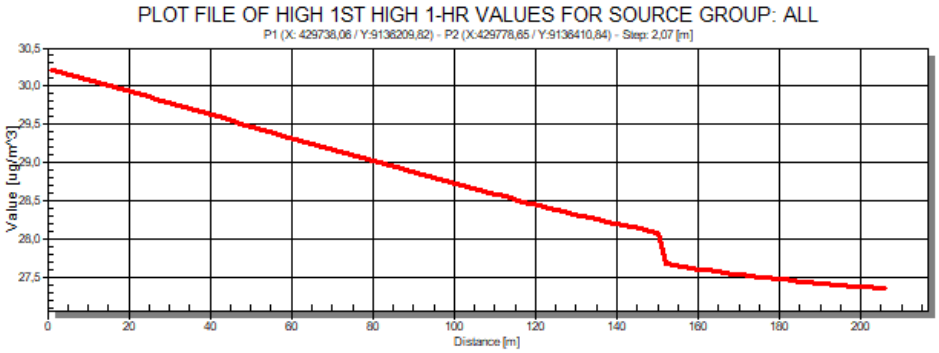
Dari Tabel 3 diketahui bahwa untuk konsentrasi lebih tinggi terjadi pada sekitar Jalan Bantul dengan konsentrasi 53,01 $\mu g/m^3$ dibandingkan dengan Jalan DI Panjaitan dengan konsentrasi 27,18 $\mu g/m^3$. Perbedaan konsentrasi dipengaruhi salah satunya karena faktor meteorologi, seperti suhu, radiasi matahari, tekanan udara, atau kelembapan udara yang menjadi faktor spesifik yang memberikan pengaruh hasil konsentrasi ozon. Faktor topografi atau elevasi permukaan tanah juga memberikan dampak terhadap sebaran ozon (O_3), dari Gambar 4.8 dapat diamati sebaran elevasi yang rendah cenderung menunjukkan konsentrasi yang lebih tinggi dibanding wilayah dengan elevasi yang lebih tinggi. Pada Gambar 4.8 diketahui bahwa konsentrasi tertinggi sejalan dengan elevasi yang lebih rendah disamping faktor arah dan kecepatan angin. Konsentrasi polutan juga dipengaruhi oleh elevasi di setiap reseptor, yang menjadi dasar dalam menentukan pola sebaran dan konsentrasi polutan menggunakan AERMOD (Sasmita et al., 2019).

Ozon (O_3) yang merupakan polutan sekunder terbawa angin yang sebagian besar mengarah dari arah barat laut ke arah tenggara (*transport* horizontal), sehingga sebaran tertinggi berada sepanjang area Jalan Brigjen Katamso hingga Jalan Parangtritis. Kecepatan angin yang dihasilkan juga memberikan banyak polutan ozon tersebar jauh. Konsentrasi perkursor ozon dapat terjadi dalam skala lokal atau mengalami *transport* yang berkontribusi pada pembentukan ozon troposfer di lokasi lain, proses ini sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin (Ambarsari, 2015). Selain itu hasil konsentrasi di titik 1 sebesar 53,01 µg/m^3 yang lebih besar dari titik 2 sebesar 27,18 µg/m^3 sejalan dengan jumlah beban emisi pada kedua titik di jalan tersebut. Pada Jalan Bantul memiliki jumlah total kendaraan yang lebih banyak dibandingkan Jalan DI Panjaitan sebesar 14.011 kendaraan dibandingkan 5.810 kendaraan. Dengan perbandingan kendaraan yang hampir setengahnya memberikan hasil beban emisi yang sama pula sehingga hasil konsentrasi yang dihasilkan antara keduanya cukup berbeda jauh.

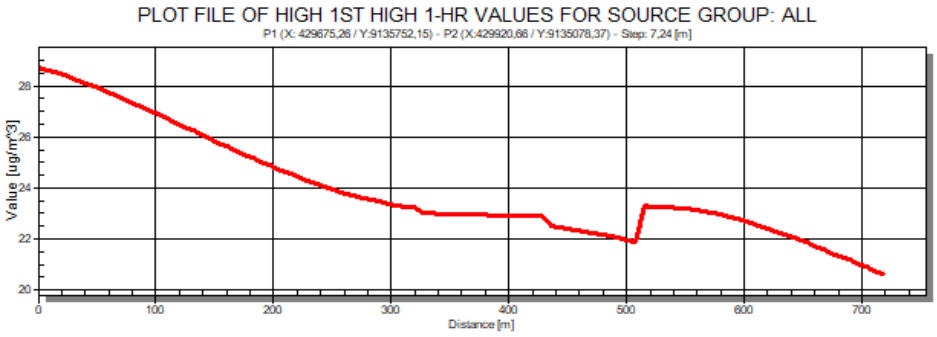
(a)



(b)



(c)



Gambar 8. Model dispersi terhadap reseptor di (a) RS PKU Muhammadiyah Yogyakarta, (b) Alun-alun kidul, dan (c) Masjid Jogokariyan.

Gambar 8 menunjukkan persebaran polutan ozon untuk tambahan reseptor pada penelitian ini. Terdapat 3 titik reseptor yaitu di Rumah Sakit PKU Muhammadiyah Kota Yogyakarta, Alun-alun Kidul Yogyakarta, dan Masjid Jogokariyan. Pengambilan 3 titik tersebut didasarkan atas posisi titik reseptor dengan area penelitian, untuk RS PKU Muhammadiyah Kota Yogyakarta yang berada di utara area penelitian, Alun-alun Kidul berada di tengah area penelitian, dan Masjid Jogokariyan berada di sebelah selatan area penelitian.

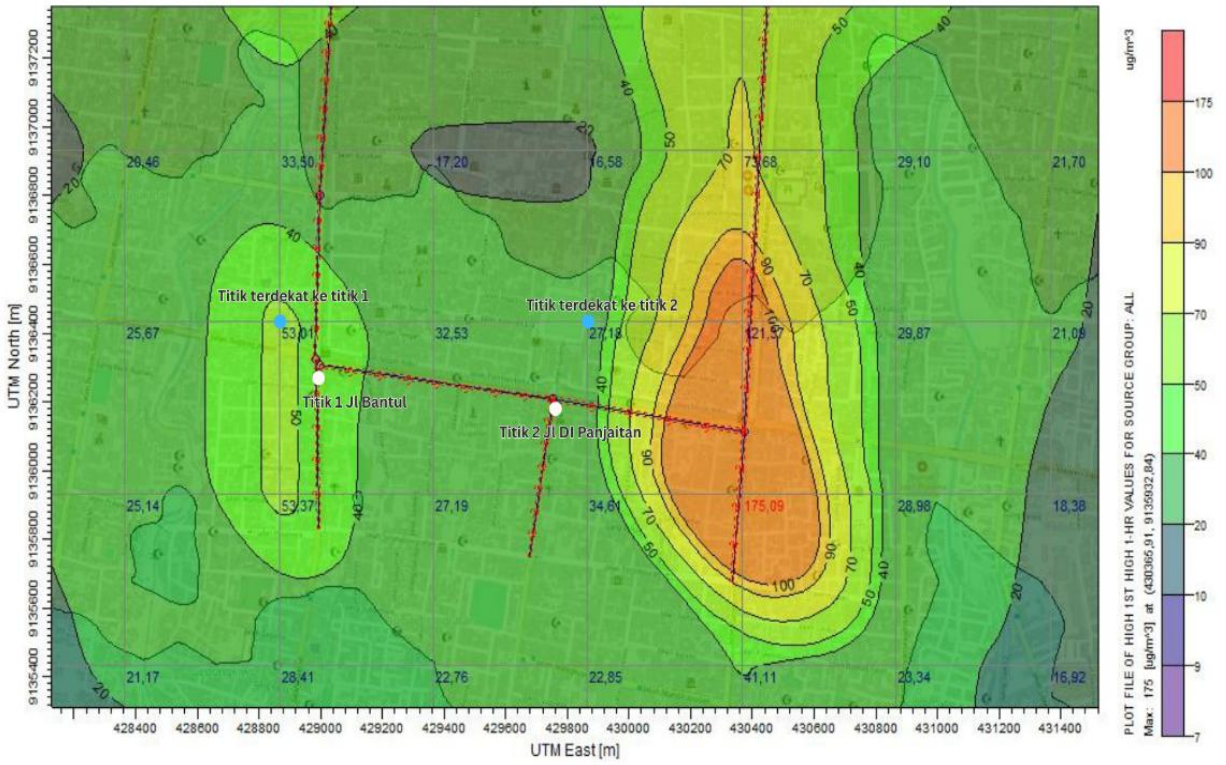
Berdasarkan Gambar 8 dapat diketahui hasil prediksi model AERMOD pada ketiga reseptor. Konsentrasi tertinggi hingga kerendah secara berurutan yaitu RS PKU Muhammadiyah sebesar 36,6 µg/m3; Alun-alun Kidul sebesar 27,5 µg/m3; dan Masjid Jogokariyan sebesar 21 µg/m3. Reseptor RS PKU menunjukkan grafik menurun ditarik dari Jalan KH Ahmad Dahlan hingga RS PKU dengan jarak 60 meter. Pada reseptor RS PKU memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan yang lain, salah satu hal yang berpengaruh seperti jarak dengan jalan yang menjadi sumber polutan. Pada grafik titik reseptor Alun-alun Kidul menunjukkan tren menurun, pada jarak 0 meter dari Jalan MT Haryono memiliki konsentrasi sebesar 30 µg/m^3 hingga mendekati Alun-alun Kidul pada jarak 200 meter memiliki konsentrasi sebesar 27,5 µg/m^3. Pada reseptor Masjid Jogokariyan, ditarik dari Jalan DI Panjaitan memiliki konsentrasi sebesar 28 µg/m^3 lalu berjarak hingga 700 meter ke selatan menjadi 21 µg/m^3. Akan tetapi pada jarak 500 meter mengalami kenaikan konsentrasi hingga sekitar 23 µg/m^3, faktor yang menjadi pengaruh salah satunya dikarenakan mendekati area yang beririsan dengan sebaran polutan antara Jalan DI Panjaitan dan Jalan Parangtritis, sehingga konsentrasi meningkat lalu semakin ke arah selatan grafik menurun kembali. Selain itu, perbedaan konsentrasi pada ketiga reseptor dipengaruhi oleh elevasi dan arah angin. Kondisi di lapangan menunjukkan elevasi yang semakin rendah ke arah selatan dan kecepatan angin berhembus ke arah tenggara menjadi pengaruh tinggi konsentrasi yang dihasilkan.

3.6 Validasi Model

Validasi model memiliki tujuan untuk mengetahui tingkat keakuratan dari model AERMOD dalam melakukan prediksi sebaran polutan di suatu area. Dari hasil pengujian validasi menggunakan RMSE didapatkan nilai RMSE sebesar 24,45 (Tabel 4). Nilai RMSE yang cenderung semakin kecil menandakan akurasi model yan dilakukan semakin baik. Akan tetapi, hasil yang telah diperoleh menunjukkan nilai yang cukup besar sehingga prediksi jauh dari keadaan yang sesuai. Pada perbandingan nilai konsentrasi aktual dan konsentrasi model di Tabel 4 (lokasi titik dapat dilihat pada Gambar 9) terdapat perbedaan nilai konsentrasi aktual dan konsentrasi model di Jalan Bantul yang cukup jauh. Ketidaksesuaian dalam pengukuran secara langsung dan model seperrti ini dapat dipengaruhi oleh transformasi fotokimia yang berbeda-beda serta pemilihan model yang perlu disesuaikan (Leksmono et al., 2006).

Tabel 4. Perhitungan akurasi pemodelan AERMOD dengan RMSE

Titik	Keterangan Titik	Konsentrasi Aktual (µg/m^3)	Konsentrasi Model (µg/m^3)	*Error*	Absolut *Error*	Kuadrat *Error*
1	Jl Bantul	18,73	53,01	-34,28	34,28	1175,12
2	Jl DI Panjaitan	22,62	27,18	-4,56	4,56	20,79
Total				-38,84	38,84	1195,91
n	2					
RMSE	24,45					



Gambar 9. Perbandingan titik aktual (putih) dan titik hasil pemodelan (biru)

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan nilai beban emisi ozon (O_3) yang dihasilkan dari kendaraan bermotor pada 10 jalan di kawasan budaya, Kota Yogyakarta sebagai berikut. Beban emisi ozon (O_3) di Jalan Wahid Hasyim sebesar 11,05 g/detik; Jalan Suryowijayan sebesar 3,67 g/detik; Jalan Bantul sebesar 6,76 g/detik; Jalan MT Haryono sebesar 7,25 g/detik; Jalan DI Panjaitan sebesar 3,14 g/detik; Jalan Mayjen Sutoyo sebesar 6,6 g/detik; Jalan Parangtritis sebesar 4,68 g/detik; Jalan Brigjen Katamso sebesar 21,63 g/detik; Jalan Panembahan Senopati sebesar 11,61 g/detik; dan Jalan KH Wahid Hasyim sebesar 19,73 g/detik. Hasil pengukuran secara langsung konsentrasi ozon (O_3) menggunakan impinger menghasilkan nilai rata-rata untuk tiap titik selama 1 jam, yaitu titik 1 (Jalan Bantul) sebesar 18,73 µg/m^3 dan titik 2 (Jalan DI Panjaitan) sebesar 22,62 µg/m^3. Hasil konsentrasi tersebut juga menunjukkan masih berada dalam baku mutu O_3 udara ambien. Pada pemodelan AERMOD polutan ozon (O_3), sebaran yang dihasilkan menunjukkan pada titik 1 nilai konsentrasi sebesar 53,01 µg/m^3 dan titik 2 memiliki nilai konsentrasi sebesar 27,18 µg/m^3. Hasil perbandingan model dispersi AERMOD dengan data aktual (pengukuran langsung) menunjukkan nilai sebesar 24,45 µg/m^3. Hal ini mengindikasikan hasil prediksi yang cukup tinggi dan kurang akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan dukungan fasilitas penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan dosen pembimbing dan rekan-rekan di Jurusan Teknik Lingkungan yang telah memberikan bimbingan, saran, serta masukan yang berharga dalam proses penelitian hingga penyusunan artikel ini.

REFERENSI

Ambarsari, N., Komala, N., Budiyono, A., (2010). Pengaruh karbon monoksida terhadap ozon permukaan. *Widyariset, 13*(3), 59–64.

Ambarsari, N. (2015). Efek radikal hydroxyl (OH) dan nitric oxide (NO) dalam reaksi kimia ozon di atmosfer. *Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional*, *16*(2), 47–54.

Dwiki Likuisa, M. S. H. A. (2019). *Sistem pemantau kualitas udara berbasis Internet of Things* [Skripsi]. Universitas Hasanuddin.

Ersa, N. S., Akbar, S. J., Fadhliani, F., Akbar, T. I. S., & Ikhwali, M. F. (2023). Analisis beban emisi pencemaran udara akibat aktivitas transportasi kendaraan bermotor di Jalan Keude Cunda, Kota Lhokseumawe. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil, 13*(2), 391–399. https://doi.org/10.29103/tj.v13i2.898.

Gonzalez, A., Mallia, D., Lin, J. C., Mitchell, L., Wilmot, T. Y., Daher, N., Sghiatti, M., & Harkins, C. (2024). Examining the sensitivity of ozone to NO_x and VOCs in the Salt Lake City urban region from spatiotemporal patterns observed using stationary and mobile observations collected from a light-rail public transit platform. *Atmospheric Environment, 334*, 120686. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120686

Indra, O., Iqbah, P., Wiliams, M., Saputro, M. J., & Waluya, U. M. (2024). Analisis kualitas udara menggunakan pendekatan sanitasi lingkungan di Kota Kendari. *JIRK: Journal of Innovation Research and Knowledge, 4*(1), 55–62.

Iriani, L., & Pribadi, D. A. (2023). Analisis sebaran konsentrasi $PM_{2.5}$ menggunakan model AERMOD di jalur protokol Kota Bogor. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan, 8*(3), 213–222. https://doi.org/10.29244/jsil.8.3.213-222

Ismahani, R., Anurogo, D. W., & Kunci, K. (2022). Pemodelan AERMOD untuk proyeksi pola penyebaran emisi heat recovery steam generator PT X dan PT Y. *Indonesian Journal of Conservation, 11*(2), 51–63. https://doi.org/10.15294/ijc.v11i2.37953

Leksmono, N. S., Longhurst, J. W. S., Ling, K. A., Chatterton, T. J., Fisher, B. E. A., & Irwin, J. G. (2006). Assessment of the relationship between industrial and traffic sources contributing to air quality objective exceedances: A theoretical modelling exercise. *Environmental Modelling & Software, 21*(4), 494–500. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.07.012

Otero, N., Sillmann, J., Schnell, J. L., Rust, H. W., & Butler, T. (2016). Synoptic and meteorological drivers of extreme ozone concentrations over Europe. *Environmental Research Letters, 11*(2), 024005. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/2/024005

Platikanov, S., Terrado, M., Pay, M. T., Soret, A., & Tauler, R. (2022). Understanding temporal and spatial changes of O_3 or NO_2 concentrations combining multivariate data analysis methods and air quality transport models. *Science of the Total Environment, 806*, 150923. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150923

Qonitan, F. D. (2018). Pengaruh fenomena El Niño Southern Oscillation (ENSO) terhadap peningkatan ozon troposferik di Indonesia. *Jurnal Rekayasa Hijau, 2*(3), 115–124. https://doi.org/10.26760/jrh.v2i3.2508

Sasmita, A., Andrio, D., & Hasiubuan, P. (2019). Pemetaan sebaran partikulat dari pembakaran limbah padat industri pengolahan sawit di Kabupaten Kampar, Riau. *Jurnal Sains dan Teknologi, 2*(1), 57–67.

Silo, K., Fandani, S. T., Sulistiyowati, H., & Setiawan, R. (2019). Tingkat pencemaran udara di Desa Silo dan Pace berdasarkan bioindikator lichen. *LIPI Pusat Limnologi*. http://limnologi.lipi.go.id/katalog/index.php/searchkat

Sulistiyono, A., Hartanto, H., Fathuroyan, F., Saputra, D., & Arifin, I. B. (2019). Studi profil ozon permukaan (O_3) dan gas monoksida (CO) antara Kota Bandung dan Bukit Kototabang. *Jurnal Ilmu Lingkungan, 17*(2), 239–247. https://doi.org/10.14710/jil.17.2.239-244

Masdat, D.W., Putra, Y.S., & Adriat, R. (2022). Keterkaitan karbon monoksida (CO) terhadap ozon permukaan (O_3) di wilayah Kalimantan Barat. *Prisma Fisika, 10*(3), 251–258.

Yoo, J. M., Lee, Y. R., Kim, D., Jeong, M. J., Stockwell, W. R., Kundu, P. K., Oh, S. M., Shin, D. B., & Lee, S. J. (2014). New indices for wet scavenging of air pollutants (O_3, CO, NO_2, SO_2, and PM_{10}) by summertime rain. *Atmospheric Environment, 82*, 226–237. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.022

Zhao, Y., Li, Y., Kumar, A., Ying, Q., Vandenberghe, F., & Kleeman, M. J. (2022). Separately resolving NOx and VOC contributions to ozone formation. *Atmospheric Environment, 285*, 119224. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119224