

Analisis Penyebaran Gas Nitrogen Dioksida (NO₂) di Jalan Raya Dramaga – Ciampea Kabupaten Bogor dengan Menggunakan Model Caline-4

Bagas A. Dewapandhu¹ dan Andik Pribadi^{*}

¹ Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Dramaga, 16680 Indonesia
^{*} Penulis koresponden: andik@apps.ipb.ac.id

Abstrak: Sektor transportasi merupakan salah satu sumber utama dari pencemaran udara yang menghasilkan gas nitrogen dioksida (NO₂). Gas NO₂ merupakan polutan yang cukup berbahaya dengan karakteristik berwarna cokelat kemerahan, berbau tajam, dan dapat menimbulkan iritasi mata dan sakit pada paru-paru. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sebaran konsentrasi NO₂ dari sumber transportasi di jalan raya Dramaga – Ciampea Kabupaten Bogor menggunakan pemodelan Caline-4 serta membandingkannya dengan pengukuran lapangan. Penelitian dimulai dengan pengumpulan data primer berupa konsentrasi NO₂ dan volume lalu lintas, serta data sekunder berupa data cuaca dan faktor emisi. Selanjutnya dilakukan pemodelan menggunakan Caline-4, dan terakhir pola sebaran divisualisasikan menggunakan ArcGIS. Berdasarkan simulasi pada periode 24 April – 2 Juni 2021 didapatkan konsentrasi NO₂ tertinggi berada di segmen 6 yang berkisar antara 0–9,1 ppm dengan nilai rata-rata sebesar 1,48 ppm. Sedangkan konsentrasi terendah berada di segmen 3 yang berkisar antara 0–2,7 ppm dengan nilai rata-rata sebesar 0,43 ppm. Konsentrasi NO₂ cenderung lebih tinggi pada pagi hari, menurun pada siang hari lalu naik lagi pada sore hari. Hal ini terutama dipengaruhi oleh perubahan volume lalu lintas pada waktu-waktu tersebut. Beberapa reseptor memperoleh konsentrasi 0,00 ppm karena berada di hulu angin dari jalan raya sebagai sumber polutannya. Hasil perbandingan model dengan pengukuran lapangan didapatkan R² sebesar 0,5835 yang berarti model ini dapat memprediksi dispersi polutan dengan akurasi sedang. Model Caline-4 juga cenderung memberikan hasil yang lebih tinggi dibandingkan pengukuran lapangan. Beberapa hal dapat menyebabkan hal ini diantaranya nilai faktor emisi, faktor cuaca, maupun metode perhitungan dalam model Caline-4 itu sendiri.

Diterima: 13 April 2023
Disetujui: 14 April 2023

Sitasi:
Dewapandhu, B.A.; Pribadi, A. Analisis Penyebaran Gas Nitrogen Dioksida (NO₂) di Jalan Raya Dramaga – Ciampea Kabupaten Bogor dengan Menggunakan Model Caline-4. *J. Teknik Sipil dan Lingkungan*. 2023; 8 (1): 67-76., <https://doi.org/10.29244/jsil.8.1.67-76>

Kata kunci: Bogor; Caline-4; lalu lintas; nitrogen dioksida; pencemaran udara.

1. Pendahuluan

Pencemaran udara adalah proses masuknya zat pencemar ke udara oleh aktivitas manusia atau alam yang menyebabkan berubahnya tatanan udara sehingga kualitas udara turun sampai ke tingkat tertentu dan tidak dapat berfungsi lagi sesuai peruntukannya [1]. Sektor transportasi merupakan salah satu sumber utama dari pencemaran udara yang menghasilkan polutan nitrogen oksida (NO_x) [2]. Reaksi NO dengan oksigen akan meningkatkan konsentrasi nitrogen dioksida (NO₂), yaitu gas berwarna merah keabu-abuan yang dapat mengakibatkan sakit mata (iritasi) dan sakit pada paru-paru pada manusia [3].

Kabupaten Bogor merupakan daerah di Indonesia dengan jumlah penduduk yang terus mengalami peningkatan tiap tahunnya [4]. Peningkatan

jumlah penduduk akan mengakibatkan peningkatan kebutuhan transportasi sehingga volume kendaraan di Bogor juga akan terus meningkat dan berpotensi menimbulkan pencemaran udara. Penelitian mengenai pemodelan dampak lalu lintas terhadap pencemaran udara dengan parameter NO₂ di daerah Bogor masih belum pernah dilakukan.

Pada tahun 2014 telah dilakukan analisis penyebaran NO₂ namun menggunakan data sekunder menggunakan citra satelit yang mencakup wilayah Jabodetabek, dan tidak berfokus pada emisi kendaraan bergerak [5]. Pada tahun 2017, telah dilakukan pengukuran konsentrasi NO₂ dari sumber kendaraan bergerak dengan menggunakan metode Griess Saltzman di Medan, namun metode ini tidak memperkirakan sebaran menggunakan model Caline-4 [6].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pola sebaran serta konsentrasi polutan NO₂ yang diterima lingkungan dari sumber lalu lintas di jalan raya Dramaga – Ciampea, Kabupaten Bogor dengan menggunakan model Caline-4. Caline-4 adalah program untuk memodelkan dispersi emisi udara dari sumber garis yang dikembangkan oleh *California Department of Transportation (Caltrans)*. Model ini menggunakan persamaan distribusi Gaussian dan konsep zona pencampuran untuk membuat perkiraan dispersi polutan di sekitar jalan raya dengan parameter yang mempengaruhi seperti meteorologi, faktor emisi, dan karakteristik lalu lintas [7].

2. Metode

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di sepanjang jalan raya Dramaga – Ciampea yang merupakan salah satu ruas jalan di Kabupaten Bogor dengan kepadatan lalu lintas yang tinggi. Jalan ini merupakan jalan utama yang menghubungkan Bogor dengan Rangkasbitung, Kabupaten Lebak, Banten. Berbagai obyek penting untuk aktivitas masyarakat terdapat di ruas jalan ini, antara lain perumahan, pertokoan, pasar, rumah sakit, sekolah, dan kampus perguruan tinggi. Sebanyak 5 titik reseptor dipilih di lokasi ini sebagai lokasi pengambilan sampel konsentrasi NO₂. Titik sampling dipilih dengan pertimbangan merupakan lokasi yang ramai dengan aktivitas masyarakat serta sebarannya merata di wilayah studi. Pada penelitian ini, ruas jalan Dramaga – Ciampea dibagi menjadi 6 segmen jalan berdasarkan karakteristik volume lalu lintas yang serupa di segmen tersebut. Peta lokasi penelitian, reseptor terpilih, serta pembagian segmen ditampilkan pada **Gambar 1**.

2.2. Prosedur Penelitian

Pengukuran lapangan dilakukan untuk mengumpulkan data primer berupa konsentrasi NO₂, geometri jalan dan volume lalu lintas. Pengambilan sampel konsentrasi NO₂ dilakukan di 5 titik reseptor sebanyak 2 kali sehari, yaitu pada pukul 08.00–09.00 dan 16.30–17.30. Pengukuran volume lalu lintas dilakukan di 6 segmen jalan sebanyak 3 kali sehari, yaitu pada pukul 08.00–09.00, 12.00–13.00, dan 16.30–17.30. Pemilihan lokasi dan waktu sampling tersebut dilakukan dengan pertimbangan agar dapat menggambarkan variasi spasial dan temporal dari lalu lintas serta kualitas udara yang dipengaruhinya. Pengukuran lapangan ini dilakukan pada periode 24 April – 2 Mei 2021.

Pengukuran konsentrasi NO₂ dilakukan dengan menggunakan metode *Griess Saltzman* sesuai dengan SNI 19-7119.2-2005 [8]. Pengamatan volume lalu lintas dilakukan selama 15 menit dengan cara direkam melalui video dan dilakukan penghitungan volume lalu lintasnya. Hasil ini kemudian dijadikan volume perjam agar bisa digunakan sebagai *input* model Caline-4. Peralatan yang digunakan dalam pengukuran lapangan dan analisis hasilnya adalah *air sampler impinger*, kamera *smartphone*, laptop, neraca analitik, dan spektrofotometer.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

Data sekunder berupa faktor emisi kendaraan didapatkan dari Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara di Daerah [9]. Nilai faktor emisi kendaraan yang dijadikan acuan dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai faktor emisi kendaraan

Kategori untuk perhitungan beban pencemar udara	Emisi NO _x
	g/km
Sepeda Motor	0,29
Mobil (Bensin)	2,00
Mobil (Solar)	3,50
Mobil (BBM jenis lain)	2,30
Bis	11,90
Truk	17,70

Sumber : Peraturan Menteri LH No. 12 Tahun 2010

Besaran beban emisi dihitung menggunakan volume lalu lintas yang didapat selama pengamatan dan faktor emisi per tipe kendaraan seperti tertera pada Tabel 1. Besaran beban emisi dihitung menggunakan Persamaan (1), kemudian satuan diubah menggunakan Persamaan (2) dari g/km/jam menjadi g/mil/jam untuk menyesuaikan input model Caline-4 [10].

$$q = \frac{\sum_{i=1}^n (EF_i \times V_i)}{T} \tag{1}$$

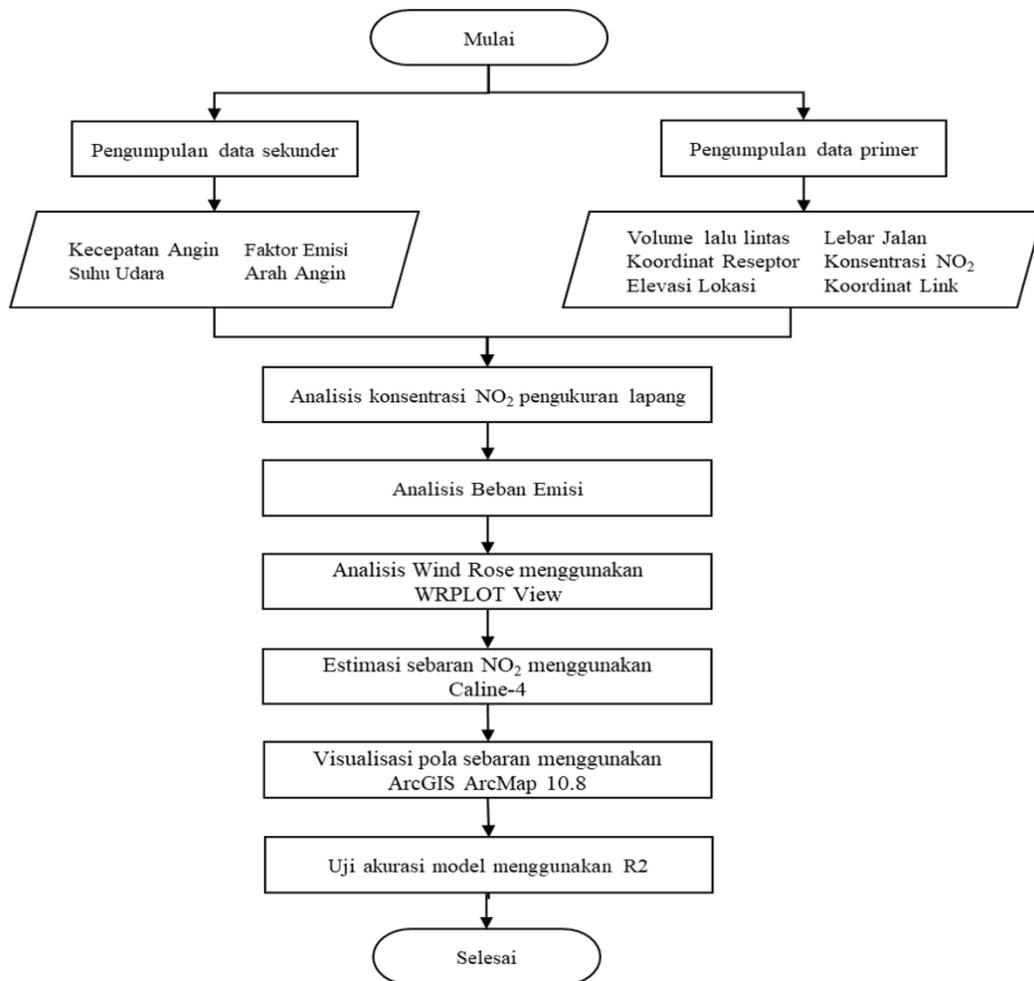
$$q \left(\frac{g}{mil/jam} \right) = 1,6 \times q \left(\frac{g}{km/jam} \right) \tag{2}$$

Keterangan:

- q = besaran beban emisi (g/km/jam)
- EF = faktor emisi kendaraan (g/km)
- V = volume kendaraan (unit/jam)
- i = tipe/jenis kendaraan
- T = total kendaraan (unit)

Data laju fotolisis NO₂ diperoleh dari hasil pengukuran konsentrasi NO, NO₂, and O₃ selama tahun 1997 di Jakarta yaitu sebesar 0,00803 det⁻¹ [11]. Data arah dan kecepatan angin, serta suhu udara didapatkan dari BMKG. Data kecepatan dan arah angin dianalisis menggunakan aplikasi WRPLOT View. Data koordinat link, koordinat reseptor, dan tinggi permukaan jalan diperoleh menggunakan aplikasi Google Earth Pro.

Data primer dan sekunder selanjutnya digunakan sebagai input model Caline-4 untuk mendapatkan estimasi konsentrasi polutan NO₂ pada titik-titik reseptor yang ditentukan. Visualisasi data dari model Caline-4 untuk memperoleh pola penyebaran polutan NO₂ dilakukan dengan menggunakan aplikasi ArcGIS 10.8. Selanjutnya validasi model dilakukan dengan cara membandingkan konsentrasi NO₂ hasil pemodelan Caline-4 dengan hasil pengukuran lapangan. Nilai koefisien determinasi (R²) digunakan sebagai parameter untuk menilai akurasi model hasil perbandingan dengan pengukuran lapangan. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada **Gambar 2**.

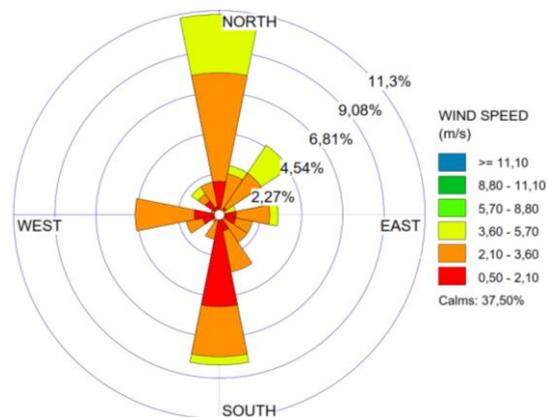


Gambar 2. Diagram alir penelitian

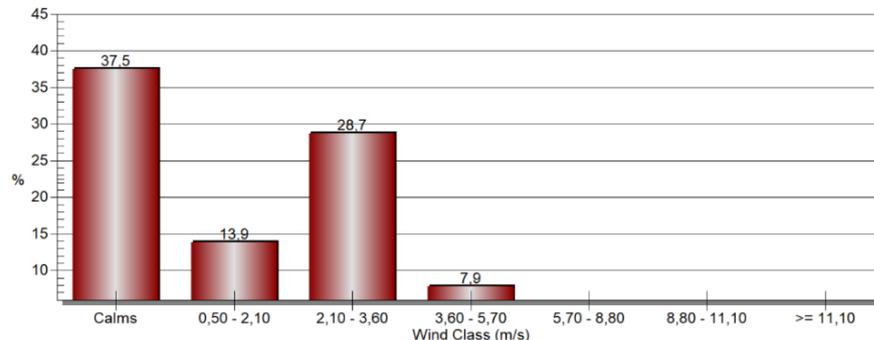
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Windrose

Data harian arah dan kecepatan angin selama periode pengukuran lapangan (24 April – 2 Mei 2021) dianalisis menggunakan aplikasi WRPLOT View untuk mendapatkan *windrose* yang merupakan gambaran arah dan kecepatan angin dominan di lokasi penelitian. Distribusi angin pada *windrose* ditandai oleh warna yang memiliki arti yang berbeda-beda pada setiap kecepatan angin pada lokasi dan jangka waktu tertentu [12]. Hasil analisis berupa *windrose* ditampilkan pada **Gambar 3**, sedangkan frekuensi distribusi angin dominan di daerah penelitian disajikan pada **Gambar 4**.



Gambar 3. *Windrose* periode 24 April – 2 Mei 2021



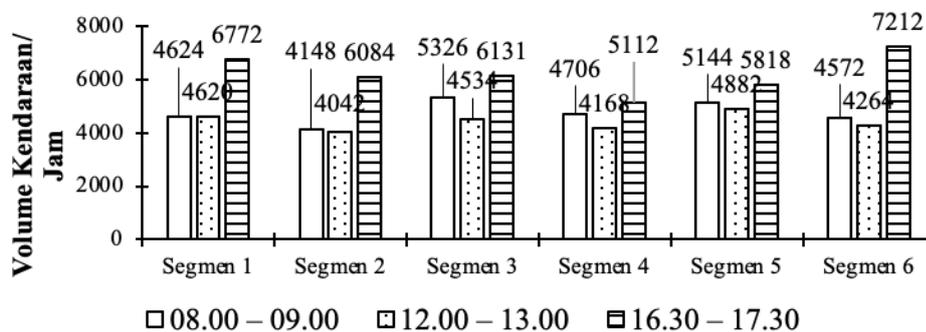
Gambar 4. Frekuensi distribusi kecepatan angin periode 24 April – 2 Mei 2021

Berdasarkan *windrose* pada **Gambar 3**, diketahui bahwa arah angin dominan berhembus dari arah utara dengan persentase sekitar 11,3% dan kecepatannya mencapai 3,6–5,7 m/s. Arah angin dominan kedua berhembus dari selatan dengan persentase sekitar 9,08% dan kecepatannya mencapai 3,6–5,7 m/s. Sedangkan berdasarkan **Gambar 4**, diketahui bahwa sebagian besar angin di daerah ini memiliki kecepatan rendah yang kurang dari 0,5 m/s (*calms*) dengan persentase 37,5%. Adapun angin dengan kecepatan cukup tinggi (3,60–5,70 m/s) memiliki persentase terendah yaitu sebesar 7,9%. Angin dominan dari arah utara menunjukkan cuaca di daerah ini sangat dipengaruhi oleh angin laut yang bertiup dari Laut Jawa di sebelah utara Bogor.

3.2. Volume Lalu Lintas

Volume lalu lintas hasil pengukuran pada 6 segmen jalan di sepanjang Jalan Raya Dramaga – Ciampea pada 3 waktu pengukuran ditampilkan pada **Gambar 5**. Volume lalu lintas tertinggi ada di segmen 6 pada sore hari pukul 16.30–17.30 dengan jumlah kendaraan 7212 unit, sedangkan volume lalu lintas terendah ada di segmen 2 pada siang hari pukul 12.00–13.00 dengan jumlah kendaraan 4042 unit. Kendaraan yang mendominasi di sepanjang jalan ini yaitu sepeda motor dengan persentase 74,73%, diikuti dengan mobil sebanyak 22,5%, bus sekitar 0,08% dan truk 2,69%. Volume lalu lintas

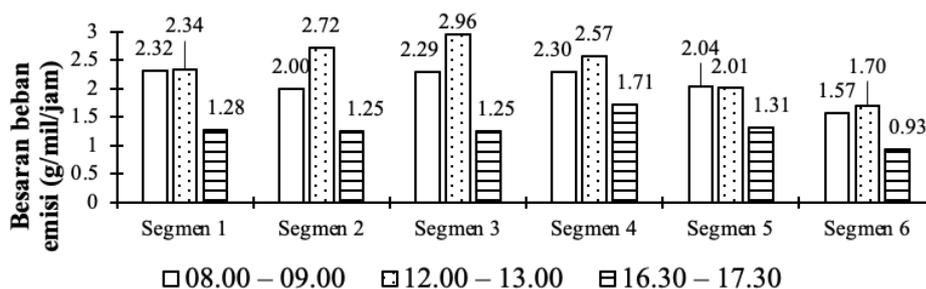
yang relatif tinggi pada pagi dan sore hari karena waktu ini merupakan jam puncak masyarakat untuk berangkat dan pulang dari bekerja atau beraktivitas.



Gambar 5. Volume lalu lintas di setiap segmen jalan

3.3. Besaran Beban Emisi Lalu Lintas

Besaran beban emisi lalu lintas dihitung berdasarkan faktor emisi kendaraan menurut Permen LH No.12 tahun 2010 untuk parameter NO_x serta volume kendaraan berdasarkan jenisnya. Hasil perhitungan beban emisi lalu lintas tersebut dapat dilihat pada **Gambar 6**.



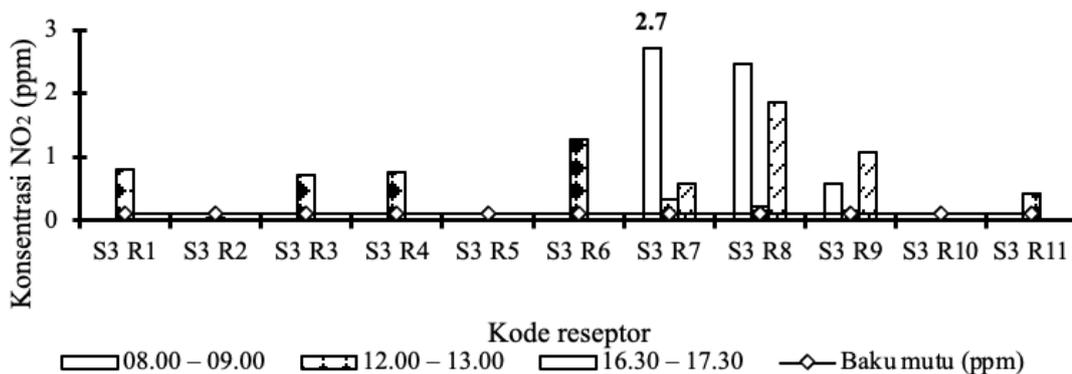
Gambar 6. Besar beban emisi NO_x di setiap segmen

Besaran beban emisi terbesar ada di segmen 3 pada waktu siang sebesar 2,96 g/mil/jam dan emisi terkecil ada di segmen 6 pada waktu sore sebesar 0,93 g/mil/jam. Apabila merujuk pada **Gambar 5** volume kendaraan di segmen 3 pada waktu siang hari sebesar 4534 kendaraan/jam lebih kecil dibandingkan volume kendaraan maksimum di segmen 6 sebesar 7212 kendaraan/jam, akan tetapi jenis kendaraan truk yang melintas di segmen 3 terpantau 266 unit lebih banyak dibandingkan segmen 6 yang hanya 28 unit. Mengingat faktor emisi NO_x dari truk menurut Permen LH No.12 tahun 2010 paling besar dibandingkan jenis kendaraan lainnya, sehingga mempengaruhi besaran beban emisi yang didapatkan.

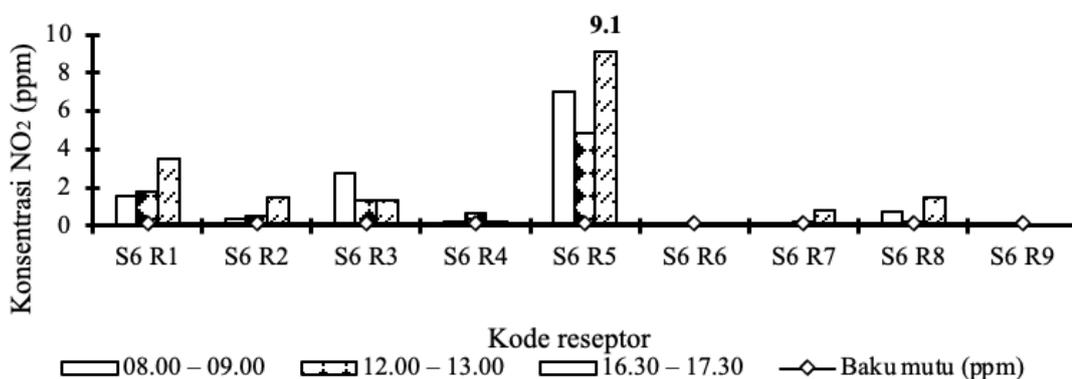
Hal ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa selain volume lalu lintas, kapasitas mesin kendaraan juga akan berpengaruh terhadap emisi polusi udara [13]. Kapasitas mesin akan mempengaruhi konsumsi bahan bakar, semakin besarnya kapasitas mesin, bahan bakar yang dibutuhkan semakin banyak sehingga emisi gas buang yang dikeluarkan juga besar.

3.4. Hasil Pemodelan Caline-4

Dalam pemodelan ini, ditetapkan beberapa titik reseptor yang tersebar di setiap segmen untuk mendapatkan output konsentrasi NO₂ di titik-titik reseptor tersebut. Dari simulasi yang dilakukan, nilai konsentrasi NO₂ rata-rata terendah terdapat di segmen 3, sedangkan yang tertinggi terdapat di segmen 6. Konsentrasi NO₂ hasil pemodelan di segmen 3 ditampilkan pada **Gambar 7**, sedangkan hasil pemodelan di segmen 6 ditampilkan pada **Gambar 8** (segmen yang lain tidak ditampilkan).



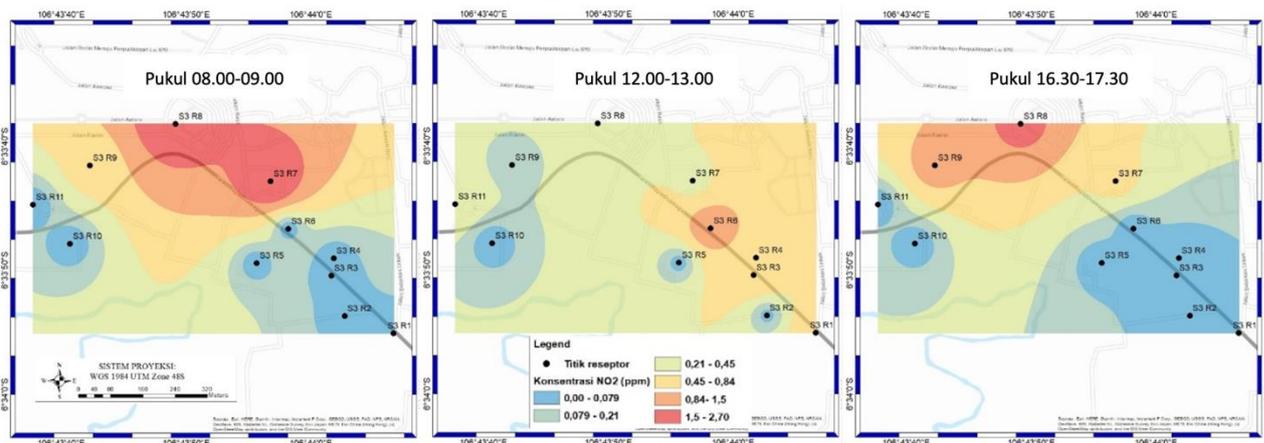
Gambar 7. Konsentrasi NO₂ hasil pemodelan Caline-4 di segmen 3



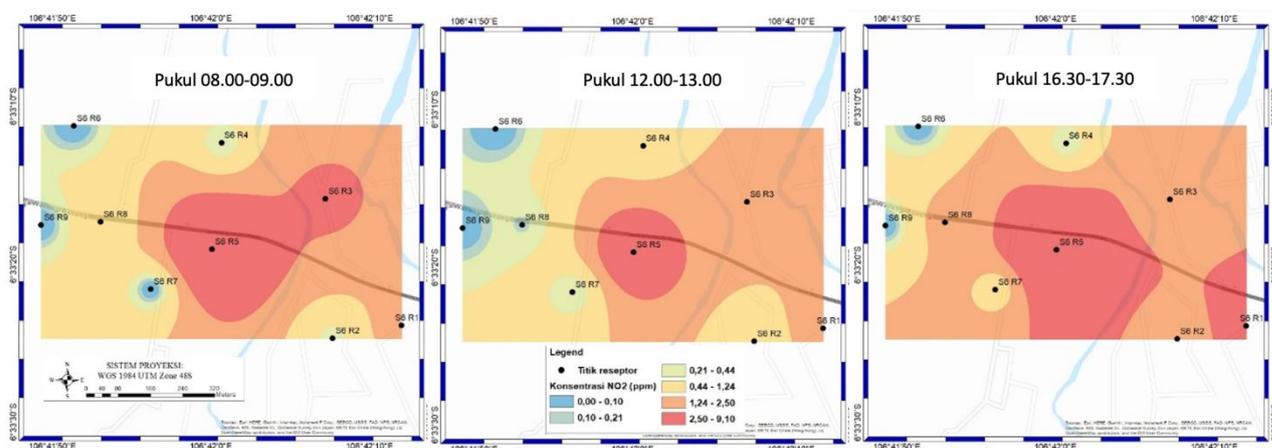
Gambar 8. Konsentrasi NO₂ hasil pemodelan Caline-4 di segmen 6

Konsentrasi NO₂ hasil pemodelan Caline-4 di segmen 3 berkisar antara 0–2,7 ppm dengan nilai rata-rata sebesar 0,43 ppm. Nilai ini telah melebihi baku mutu NO₂ sebesar 0,3 ppm. Konsentrasi NO₂ tertinggi sebesar 2,7 ppm pada pukul 08.00–09.00 terdapat di reseptor S3R7. Konsentrasi terendah sebesar 0 ppm tersebar di 8 reseptor pada segmen ini yaitu S3R1, S3R2, S3R3, S3R4, S3R5, S3R6, S3R10, dan S3R11. Adapun di segmen 6, konsentrasi NO₂ berkisar antara 0–9,1 ppm dengan nilai rata-rata sebesar 1,48 ppm. Nilai ini juga telah melebihi baku mutu NO₂. Konsentrasi NO₂ tertinggi sebesar 9,1 ppm terdapat di reseptor S6R5 pada pukul 16.30–17.30. Sedangkan konsentrasi NO₂ terendah sebesar 0 ppm terdapat di 2 reseptor pada segmen ini yaitu S6R6 dan S6R9. Perbedaan tinggi rendahnya konsentrasi NO₂ antar segmen ini diakibatkan perbedaan nilai data inputnya terutama volume lalu lintas sebagai sumber emisinya. Beberapa reseptor mempunyai konsentrasi NO₂ sebesar 0 ppm karena titik reseptor ini berada pada daerah hulu angin (*upwind area*) sehingga tidak menerima sebaran polutannya.

Nilai konsentrasi NO₂ pada titik-titik reseptor ini selanjutnya diinterpolasi menggunakan bantuan software ArcGIS 10.8 untuk mendapatkan pola sebaran spasialnya. Pola sebaran di area segmen 3 dan 6 bisa dilihat pada **Gambar 9** dan **Gambar 10**. **Gambar 9** menunjukkan konsentrasi NO₂ di area segmen 3 memiliki sebaran yang cukup bervariasi. Konsentrasi NO₂ paling tinggi mencapai 2,7 ppm terjadi pada pagi hari di tengah area ini yang merupakan lokasi kampus IPB Dramaga. Konsentrasi NO₂ di area ini cenderung menurun pada siang hari namun naik lagi pada sore hari. Dinamika ini juga terjadi di area segmen 6 (**Gambar 10**). Konsentrasi NO₂ di segmen ini lebih tinggi daripada segmen 3 yang mencapai 9,1 ppm yang terjadi pada pagi dan sore hari. Pada siang hari, konsentrasi NO₂ di area ini juga cenderung menurun. Pola penyebaran spasial konsentrasi NO₂ ini sangat dipengaruhi oleh kecepatan dan arah angin yang terjadi [14]. Angin yang berhembus di area ini memiliki kecepatan rata-rata sebesar 2 m/s dengan arah angin yang berubah-ubah. Pada pukul 08.00–09.00, angin berhembus dari selatan barat daya (216°), pukul 12.00–13.00 dari selatan tenggara (165°) dan pukul 16.30–17.30 dari arah selatan (183°). Hal ini menyebabkan penyebaran NO₂ cenderung ke arah utara dari jalan raya.



Gambar 9. Sebaran konsentrasi NO₂ di area segmen 3



Gambar 10. Sebaran konsentrasi NO₂ di area segmen 6

3.5 Uji Akurasi Model

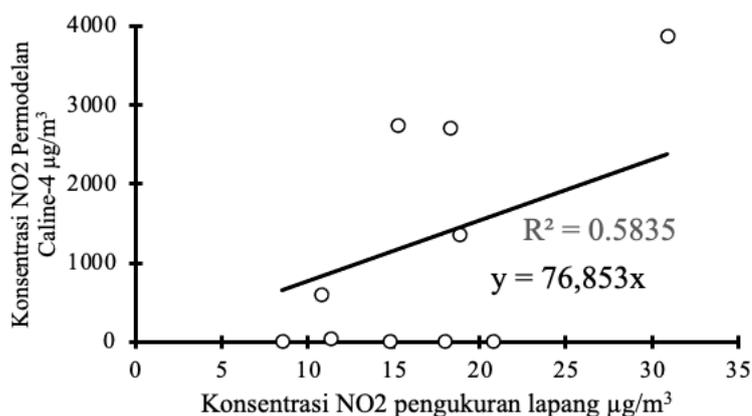
Uji akurasi model dilakukan dengan membandingkan konsentrasi NO₂ hasil simulasi model dengan hasil pengukuran lapangan pada 5 reseptor. Perbandingan ini disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Perbandingan konsentrasi NO₂ model Caline-4 dengan pengukuran lapangan

Nomor	Lokasi reseptor	Waktu pengukuran	Konsentrasi pengukuran lapangan (µg/m ³)	Konsentrasi model Caline-4 (µg/m ³)
1	Masjid M Hasyim	08.00 – 09.00	18,02	0,00
		16.30 – 17.30	10,82	602,12
2	MCD Dramaga	08.00 – 09.00	18,30	2709,54
		16.30 – 17.30	30,90	3876,15
3	Gerbang IPB	08.00 – 09.00	14,77	0,00
		16.30 – 17.30	8,54	0,00
5	GOR Paser	08.00 – 09.00	11,37	37,63
		16.30 – 17.30	20,78	0,00
6	Masjid Al-Ittihad	08.00 – 09.00	18,83	1354,77
		16.30 – 17.30	15,28	2747,17

Hasil pengukuran lapangan di 5 reseptor didapatkan bahwa nilai konsentrasi NO₂ tertinggi ada di Mcd Dramaga pada sore hari sebesar 30,90 µg/m³. Nilai konsentrasi NO₂ terendah ada di Gerbang IPB

pada sore hari sebesar 8,54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sedangkan pada pemodelan Caline-4 didapatkan konsentrasi tertinggi ada di MCD dramaga pada sore hari sebesar 3876,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nilai konsentrasi terendah sebesar 0,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ada pada pukul 08.00–09.00 untuk Masjid M Hasyim, Gerbang IPB, Gor Paser, dan pada pukul 16.30–17.30 untuk Gerbang IPB. Hasil pemodelan Caline-4 cenderung memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan hasil pengukuran lapangan. Banyak hal yang mungkin mempengaruhi hal ini diantaranya nilai faktor emisi, faktor cuaca, maupun metode perhitungan dalam model Caline-4 itu sendiri. Penelitian lebih lanjut dibutuhkan untuk dapat mengungkap hal ini. Grafik perbandingan model dengan pengukuran lapangan ditampilkan pada **Gambar 11**.



Gambar 11. Perbandingan konsentrasi NO₂ hasil pemodelan Caline-4 dengan hasil pengukuran lapangan

Koefisien determinasi (R^2) diperoleh sebesar 0,5835. Hal ini menunjukkan bahwa model Caline-4 dapat memberikan hasil simulasi konsentrasi NO₂ dengan akurasi sedang. Hal ini karena pemodelan Caline-4 hanya menggunakan sumber emisi lalu lintas dan tidak memperhitungkan sumber yang lain. Pada kondisi sebenarnya di lapangan, selain dipengaruhi oleh lalu lintas, konsentrasi NO₂ juga dipengaruhi oleh berbagai sumber lain diantaranya emisi pembakaran dari perumahan, industri, dan penguraian senyawa organik. Hal ini juga sesuai dengan studi sebelumnya yang menyatakan bahwa konsentrasi hasil pemodelan Caline-4 hanya memperhitungkan emisi NO₂ dari sumber transportasi dan mengabaikan sumber lain [15].

4. Kesimpulan

Pola penyebaran konsentrasi NO₂ dari sumber lalu lintas di jalan raya Dramaga – Ciampea telah dapat disimulasikan dengan menggunakan model Caline-4. Hasil simulasi untuk periode 24 April – 2 Juni 2021 menunjukkan konsentrasi NO₂ tertinggi ada di segmen 3 sebesar 9,10 ppm yang terjadi pada pagi dan sore hari. Konsentrasi NO₂ terendah sebesar 0,00 ppm terdapat di beberapa reseptor di setiap segmen. Konsentrasi 0,00 ppm diperoleh karena titik reseptor ini berada pada daerah hulu angin (*upwind area*) sehingga tidak menerima sebaran polutannya. Konsentrasi NO₂ cenderung lebih tinggi pada pagi, turun pada siang hari dan naik lagi pada sore hari.

Hasil perbandingan konsentrasi NO₂ Caline-4 dengan pengukuran lapangan diperoleh nilai R^2 sebesar 0,5835 yang berarti model Caline-4 memiliki akurasi sedang. Hasil simulasi Caline-4 juga memberikan nilai yang cenderung lebih tinggi dibandingkan hasil pengukuran lapangan. Beberapa hal dapat menyebabkan hal ini diantaranya nilai faktor emisi, faktor cuaca, maupun metode perhitungan dalam model Caline-4 itu sendiri.

Daftar Pustaka

- [1] [PP] Peraturan Pemerintah No. 21 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Hidup. Jakarta (ID): Pemerintah Republik Indonesia; 2021.
- [2] Wardhana WA. Dampak Pencemaran Lingkungan, Edisi Revisi. Yogyakarta (ID): Andi Press; 2004.
- [3] Daryanto. Masalah Pencemaran. Bandung (ID): PT. Tarsito; 2004.

- [4] [BPS] Badan Pusat Statistik Kabupaten Bogor. Kabupaten Bogor Dalam Angka 2021. Penyediaan Data Untuk Perencanaan Pembangunan. Bogor (ID): 2021.
- [5] Firdaus E. Analisis sebaran gas NO₂ di wilayah Jabodetabek periode 2005-2013 menggunakan data Ozone Monitoring Instrument (OMI) pada satelit Aura [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor; 2014.
- [6] Putri YN. Analisis pengaruh beban emisi CO dan NO₂ dari kendaraan bermotor terhadap kualitas udara ambien roadside [skripsi]. Medan: Universitas Sumatera Utara; 2017.
- [7] Benson P. CALINE 4-A Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Concentrations Near Roadways. Sacramento (US): California Department of Transportation; 1989.
- [8] [BSN] Badan Standardisasi Nasional. SNI 19-7119.2-2005. Udara Ambien—Bagian 2: Cara Uji Kadar Nitrogen Dioksida (NO₂) dengan Metode Griess Saltzman menggunakan Spektrofotometer. Jakarta (ID): Badan Standardisasi Nasional; 2005.
- [9] [Permen] Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 Tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara Di Daerah. Jakarta (ID): Kementerian Negara Lingkungan Hidup; 2010.
- [10] Muchtar F. Analisis emisi kendaraan berbasis model Caline-4 di jalan nasional pada kawasan Mamminasata [skripsi]. Makassar (ID): Universitas Hasanuddin Makassar; 2018.
- [11] LAPAN. Proses fotokimia atmosfer laju fotolisis NO₂ dan fotoketunakan NO/NO₂/O₃ Studi kasus di Jakarta. Warta LAPAN. 2 (1): 40–44; 2000.
- [12] Utami AR, Surachman L. Evaluasi azimuth landasan Bandar Udara Internasional Husein Sastranegara dengan metode windrose. Jakarta: Universitas Trisakti. 2019.
- [13] Muziansyah D, Sulistorini R, Sebayang S. Model emisi gas buangan kendaraan bermotor akibat aktivitas transportasi (Studi kasus: Terminal Pasar Bawah Ramayana Kota Bandar Lampung). JRSDD. 3(1): 57–70; 2015.
- [14] Dwirahmawati F, Nasrullah N, Sulistyantara B. Analisis perubahan konsentrasi nitrogen dioksida (NO₂) pada area bervegetasi dan tidak bervegetasi di jalan simpang susun. Jurnal Lanskap Indonesia. 10(1):1317; 2018.
- [15] Bachtiar VS, Ritonga SH. Uji validasi program Caline-4 terhadap dispersi gas NO₂ dari sektor transportasi di Kota Padang. Padang (ID): Seminar Nasional Sains dan Teknologi Lingkungan II. 16 Oktober 2016.