

Pemodelan AERMOD Sebaran NO₂ Pengangkutan Batubara di Batu Sopang Kalimantan Timur

Rafiuddin^{1*}, Irfan Said²

¹Program studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Pejuang Republik Indonesia, Makassar

²Program studi Teknik Informatika Fakultas Teknik Universitas Pejuang Republik Indonesia, Makassar

*Corresponding Author

E-mail Address: rafiudin1526@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini menyimulasikan sebaran gas NO₂ dampak kegiatan pengangkutan batubara di Batu Sopang, Kalimantan Timur. Simulasi sebaran NO₂ dilakukan menggunakan pemodelan AERMOD. Sumber emisi NO₂ berasal dari sisa pembakaran dump truk pengangkut batubara yang melalui jalan hauling sepanjang 21,14 km. Laju emisi NO₂ dari kegiatan pengangkutan batubara sebesar 3,74 g/s. Hasil simulasi numerik dibagi kedalam 3 periode kuadrimester sepanjang tahun 2022. Hasil numerik akan divalidasi dengan data hasil pemantauan pada 10 titik disekita lokasi penelitian untuk mengetahui tingkat akurasi model yang digunakan. Nilai RMSPE model numerik pada periode kuadrimester kedua tahun 2022 sebesar 46,84%. Tingkat akurasi pada periode kuadrimester kedua sedikit lebih baik dibandingkan dengan periode kuadrimester pertama dan ketiga yang masing-masing memiliki nilai RMSPE sebesar 54,81% dan 60,96%.

Kata Kunci : AERMOD; Nitrogen dioksida; Udara ambien; Emisi;

ABSTRACT

This paper simulates the distribution of NO₂ gas due to coal transportation activities in Batu Sopang, East Kalimantan. NO₂ distribution simulations were carried out using AERMOD modelling. The source of NO₂ emissions come from the combustion residue of dump trucks carrying coal along the 21.14 km long hauling road. The NO₂ emission rate from coal transportation activities is 3.74 g/s. The numerical simulation results are divided into 3 quadrimester periods throughout 2022. The numerical results will be validated with monitoring data at 10 points around the research location to determine the level of accuracy of the model used. The RMSPE value of the numerical model in the second quadrimester period of 2022 is 46.84%. The level of accuracy in the second quadrimester period was slightly better compared to the first and third quadrimester periods, which respectively had RMSPE values of 54.81% and 60.96%.

Keywords : AERMOD; Nitrogen dioxide; Ambient air; Emission

PENDAHULUAN

Aktivitas pertambangan batubara di Indonesia telah memberikan keuntungan dalam sisi ekonomi, akan tetapi juga memiliki dampak yang buruk terhadap kualitas lingkungan hidup. Menurunnya kualitas udara dan air disekitar wilayah

penambangan dapat memberikan dampak buruk bagi masyarakat sekitar. Air asam tambang mempengaruhi kualitas air permukaan yang mungkin saja dikonsumsi masyarakat sekitar area penambangan. Aktivitas kendaraan

angkutan yang berlalu lalang menyebabkan terjadi penurunan kualitas udara.

Kegiatan pengangkutan batubara meningkatkan jumlah partikulat dan gas sisa pembakaran seperti TSP, CO, SO₂, NO₂, dan gas-gas sisa pembakaran lainnya dapat berdampak bagi kesehatan masyarakat. Emisi kendaraan bermotor tetap menjadi perhatian karena dampaknya pada kesehatan dan lingkungan khususnya dalam membatasi pembentukan lapisan ozon di atmosfer ((Hall et al., 2020; Jin et al., 2020; Tan et al., 2018) . Parameter nitrogen-dioksida (NO₂) merupakan salah satu parameter untuk mengevaluasi kualitas udara karena kaitannya dengan emisi pembakaran kendaraan bermotor. Peningkatan jumlah kendaraan diesel memberikan kontribusi besar terhadap emisi gas NO₂ meskipun dalam beberapa dekade terakhir telah dilakukan pengembangan teknologi untuk mengurangi dampak emisi gas buang (Carslaw et al., 2019).

Berbagai penelitian telah memvalidasi bahwa paparan NO₂ meningkatkan resiko pada gangguan kesehatan dan kematian. Paparan NO₂ dalam intensitas tinggi menyebabkan kerugian bagi manusia, termasuk kematian (Chen et al., 2007) . Penelitian terhadap 4.800 wanita Jerman yang diikuti selama 18 tahun menunjukkan bahwa paparan dalam jangka panjang dari NO₂ berkaitan dengan angka kematian (Heinrich et al., 2013) . Pada penelitian lain juga menunjukkan hubungan antara kematian yang disebabkan oleh gangguan kardiovaskular dengan NO₂ (Hvidtfeldt et al., 2019). Selain itu, diperkirakan bahwa setiap tahunnya terdapat 4 juta kasus baru asma pada anak yang disebabkan oleh polusi NO₂ (Achakulwisut et al., 2019).

Penelitian mengenai pemodelan penyebaran NO₂ telah banyak dilakukan. Perbandingan antara hasil pemantauan dengan hasil pemodelan numerik penyebaran NO₂ menggunakan AERMOD NO₂ di Kota Kigali, Rwanda menunjukkan hasil yang cukup baik (Irankunda et al., 2022) . Pemodelan AERMOD juga

digunakan untuk menyimulasikan emisi NO₂ dari kompleks pabrik semen di Thailand (Seangkiatiyuth et al., 2011) . Selain itu, AERMOD juga digunakan untuk menyimulasikan polusi disekitar jalan raya dengan berbagai sumber emisi yang berbeda (Askariyeh et al., 2017).

AERMOD merupakan model dispersi Gaussian plume dalam kondisi tunak (*steady-state*) yang ditujukan untuk penyebaran polusi udara jarak dekat (<50 km) dari sumber titik, area, maupun sumber volume. AERMOD menggabungkan pemrosesan data meteorologi dengan teori *Planetary Boundary Level* (PBL) yang berfungsi untuk menggantikan kelas stabilitas Pasquill–Gifford. Algoritma AERMOD mempertimbangkan efek variasi dari kecepatan angin, suhu, dan turbulensi. AERMOD diklaim memberikan hasil yang baik pada area pegunungan karena mampu memasukkan detail informasi struktur vertikal lapisan batas (Cimorelli et al., 2004; Gibson et al., 2013; Perry et al., 2005).

Pada penelitian ini akan difokuskan pada pemodelan emisi NO₂ disekitar jalan hauling penambangan batubara di kecamatan Batu Sopang, Kabupaten Paser, Kalimantan Timur. Pemodelan emisi NO₂ menggunakan AERMOD untuk mengetahui tingkat sebaran konsentrasi NO₂ periode 24 jam dari kegiatan pengangkutan batubara dalam radius 20 x 20 km yang terbagi menjadi tiga kuadrimester tahun 2022. Hasil-hasil pemodelan AERMOD akan dibandingkan dengan hasil pemantauan dilapangan untuk mengetahui tingkat akurasi dari simulasi yang dilakukan.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Lokasi kegiatan penelitian dilakukan di Kecamatan Batu Sopang, Kabupaten Paser. Secara administratif, wilayah ini terletak di Provinsi Kalimantan Timur dengan Batu Kajang sebagai ibukota kecamatan. Kecamatan Batu Sopang tahun 2022 memiliki jumlah penduduk sebanyak 27.632 jiwa. Kecamatan Batu Sopang memiliki wilayah seluas 1.111,38

km² dengan tingkat kepadatan penduduk 24,86 orang per km². (BPS Kab. Paser, 2023).

Lokasi penelitian terdapat beberapa blok penambangan batubara yang diperkirakan memberikan dampak pada lingkungan sekitar. Salah satu kegiatan dari penambangan batubara yang terjadi adalah proses pengangkutan batubara. Dalam penelitian ini, akan difokuskan kepada dampak kegiatan pengangkutan batubara terhadap kualitas udara di lokasi penelitian. Tingginya aktivitas pengangkutan batubara dibarengi dengan tingginya konsumsi bahan bakar. Sisa pembakaran bahan bakar inilah yang mempengaruhi kualitas udara ambien. NO₂ merupakan salah satu gas yang dihasilkan dari sisa pembakaran bahan bakar. Untuk memvalidasi keakuratan hasil pemodelan numerik, terdapat data hasil pemantauan emisi NO₂ dari 10 titik yang berbeda sepanjang tahun 2022 dari lokasi penelitian.

Pemodelan AERMOD

Pemodelan AERMOD terdiri dari AERMET, AERMAP, dan model AERMOD itu sendiri. AERMET menggunakan data meteorologi dan karakteristik permukaan untuk menghitung lapisan batas parameter, misalnya tinggi pencampuran, kecepatan gesekan, dan lain-lain yang dibutuhkan AERMOD. Data ini harus mewakili keadaan meteorologi dalam domain pemodelan. AERMAP digunakan untuk mengkarakterisasi medan dan menghasilkan jaringan reseptor untuk model dispersi AERMOD. AERMAP menggunakan data medan grid untuk area pemodelan guna menghitung pengaruh ketinggian medan yang terkait dengan lokasi reseptor (Cimorelli et al., 2004).

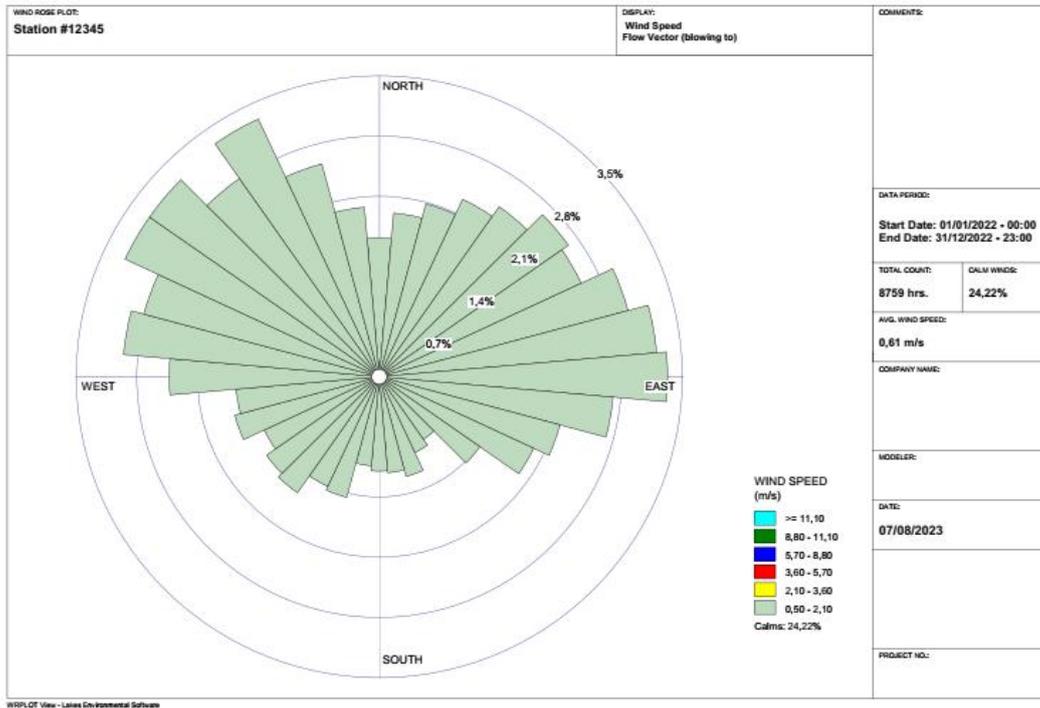
Model AERMOD merupakan model yang dirancang untuk mengestimasi dampak jarak dekat dari berbagai jenis sumber-sumber industri. AERMOD berupa model dispersi tunak Gaussian plume. Dalam model ini, pada lapisan batas stabil, diasumsikan distribusi konsentrasi menjadi Gaussian baik secara vertikal maupun horizontal. Dengan menggunakan pendekatan yang relatif sederhana, AERMOD menggabungkan konsep tentang aliran dan dispersi pada medan yang kompleks. AERMOD memiliki kemampuan dalam mengkarakterisasi teori *Planetary Boundary Level* (PBL). Model AERMOD dapat diterapkan pada wilayah pedesaan dan perkotaan, medan datar dan kompleks, dan berbagai sumber emisi termasuk sumber titik, luas, dan volume (Cimorelli et al., 2004).

HASIL DAN PEMBAHASAN

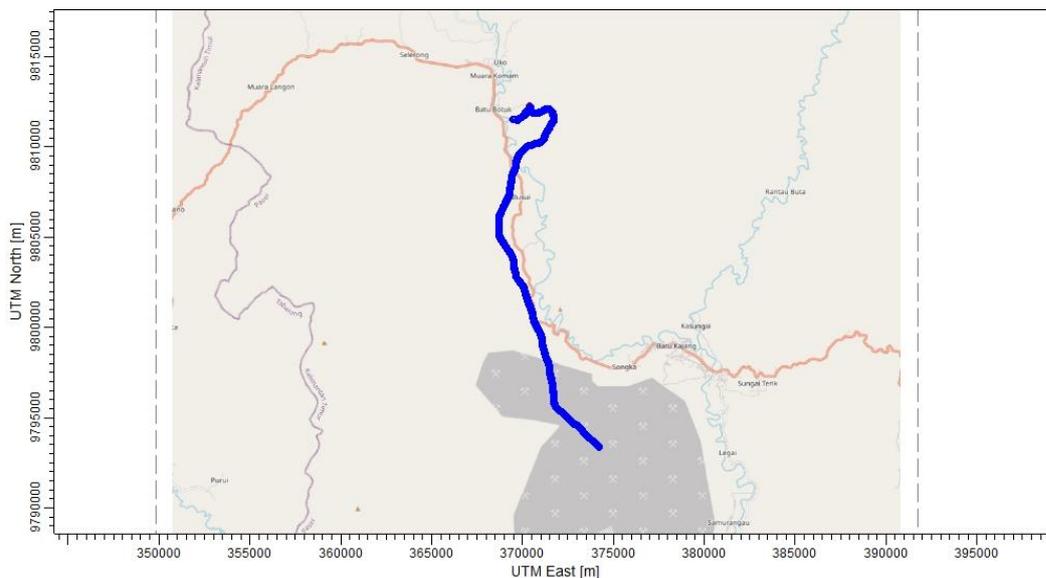
Mawar Angin dan Sumber Emisi

Arah angin pada lokasi penelitian sepanjang tahun 2022 dominan berhembus ke arah timur dan barat laut dengan kecepatan antara 0,5 – 2,1 m/s. Kecepatan angin rata-rata pada lokasi penelitian sebesar 0,61 m/s. Data kecepatan dan arah angin tahun 2022 pada lokasi penelitian diperoleh dari NASA Power Data Access Viewer. Data tersebut diolah dan diproses dengan AERMET untuk memperoleh profil meteorologi lokasi penelitian. Mawar angin lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

Penyebaran emisi polutan berasal dari kegiatan pengangkutan batubara yang bersumber dari jalur angkut yang dilalui kendaraan selama proses kegiatan. Garis biru pada Gambar 4 menunjukkan jalur angkut yang dilalui kendaraan dalam kegiatan pengangkutan batubara sepanjang 21,14 km.



Gambar 1 Mawar angin dan kecepatan angin pada lokasi penelitian tahun 2022



Gambar 2. Sumber emisi NO_2 berasal dari jalan hauling pengangkutan batubara yang dilalui dump truk.

Emisi NO

Kegiatan pengangkutan batubara membutuhkan penggunaan bahan bakar untuk operasional kendaraan. Penggunaan bahan bakar ini menghasilkan emisi gas rumah kaca NO_2 . Jumlah dump yang digunakan dalam

kegiatan pengangkutan batubara sebanyak 36 unit. Dalam sehari, setiap dump truk melakukan 10 trip pengangkutan batubara dengan waktu operasi selama 20 jam (2 shift). Jumlah trip yang dump truk sebanyak 360 trip. Total jarak perjalanan yang dilalui selama

proses pengangkutan batubara adalah 15.220,8 km. Faktor emisi NO₂ bahan bakar solar adalah 17,7 g/km (PermenLH

no.12 tahun 2010). Emisi gas NO₂ yang dihasilkan dari kegiatan pengangkutan batubara dalam sehari adalah

$$\begin{aligned} \text{Emisi NO}_2 &= \text{Faktor Emisi} \times \text{Jarak Tempuh} \\ &= 17,7 \frac{\text{g}}{\text{km}} \times 15220,8 \text{ km} \\ &= 269.408,16 \text{ g} \end{aligned}$$

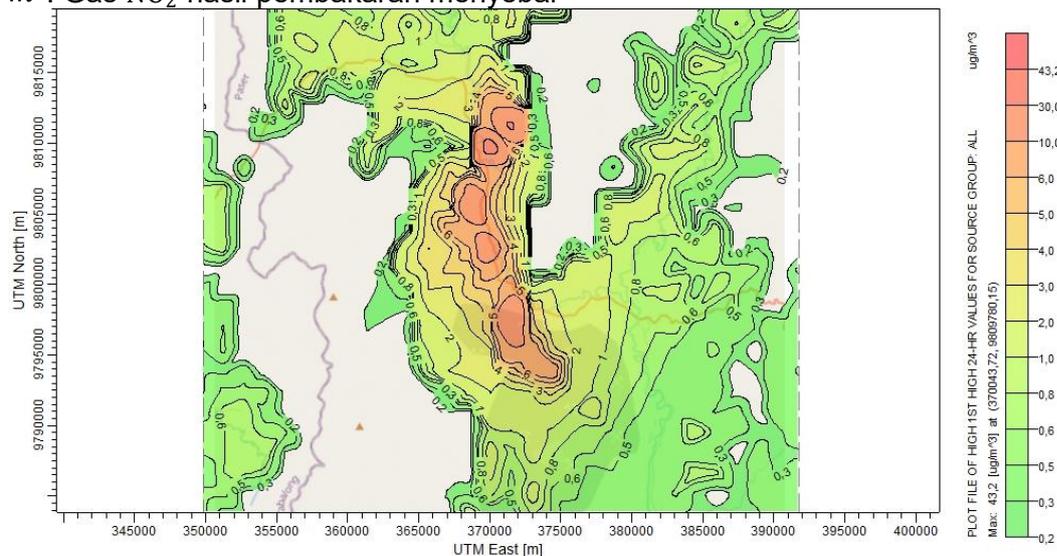
Laju emisi NO₂ yang dihasilkan dari kegiatan pengangkutan batubara adalah:

$$\begin{aligned} \text{Laju Emisi NO}_2 &= \frac{\text{Emisi NO}_2}{\text{Waktu Pengangkutan}} \\ &= \frac{269.408,16 \text{ g}}{20 \text{ jam}} \\ &= 3,74 \text{ g/s} \end{aligned}$$

Hasil Pemodelan

Hasil pemodelan penyebaran polutan NO₂ dalam periode kuadrimester pertama (Januari – April 2022) dapat dilihat pada Gambar 3. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa konsentrasi sebaran NO₂ disekitar jalan angkut tersebar antara 6 – 43,2 μg/m³. Gas NO₂ hasil pembakaran menyebar

ke arah tenggara, timur dan barat laut dari jalan angkut dengan tingkat konsentrasi kurang dari 6 μg/m³. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kualitas udara pada lokasi penelitian masih dibawah baku mutu udara ambien gas NO₂ periode 24 jam sebesar 60 μg/m³.



Gambar 3. Hasil simulasi sebaran NO₂ periode 24 jam pada lokasi penelitian dalam kuadrimester pertama 2022

Tabel 1 menunjukkan perbandingan antara hasil solusi numerik dengan hasil pemantauan pada 10 titik koordinat yang berbeda dalam periode kuadrimester pertama tahun 2022. Hasil simulasi numerik akan dibandingkan dengan hasil pengukuran NO₂ dilapangan. Validasi solusi numerik terhadap hasil pemantauan dilakukan dengan metode

Root Mean Square Percent Error (RMSPE) yang menghitung persentase galat hasil simulasi terhadap hasil pemantauan lapangan. RMSPE dihitung dengan formula:

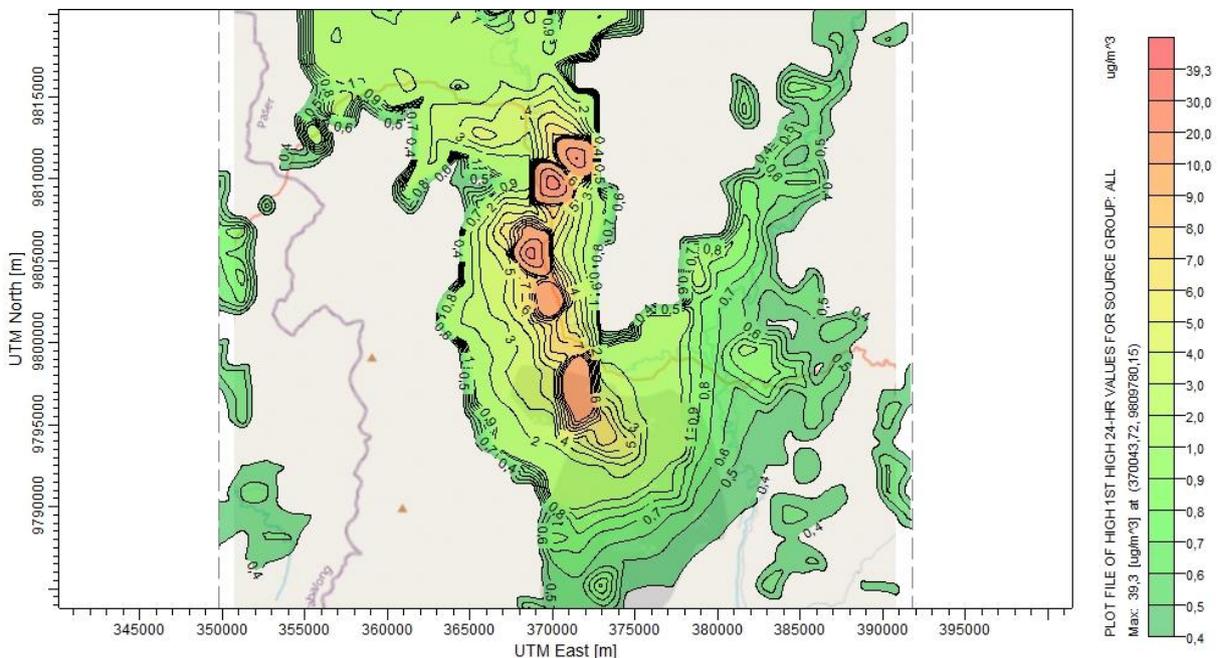
$$\text{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i - P_i}{P_i} \right)^2 \right]} \times 100\%$$

Tabel 1. Perbandingan hasil pemantauan dengan hasil simulasi numerik pada periode kuadrimester pertama tahun 2022.

Titik Lokasi	Koordinat		Hasil Pemantauan	Hasil Simulasi	Nilai RMSPE
	S	E			
U-01	01° 43' 33,4"	115° 49' 47,8"	31	30	54,81%
U-02	01° 40' 34,8"	115° 49' 10,1"	21	3	
U-03	01° 48' 25,1"	115° 50' 14,9"	33	6	
U-04	01° 43' 47,3"	115° 49' 36,0"	24	20	
U-05	01° 43' 02,4"	115° 49' 50,6"	32	40	
U-06	01° 44' 33,9"	115° 49' 52,9"	29	7	
U-07	01° 43' 43,1"	115° 50' 10,3"	31	30	
U-08	01° 41' 31,4"	115° 49' 36,6"	20	7	
U-09	01° 44' 42,2"	115° 49' 13,9"	28	10	
U-10	01° 42' 23,9"	115° 49' 29,9"	26	6	

Hasil simulasi numerik mampu menunjukkan hasil yang cukup baik pada beberapa titik pemantauan. Meskipun begitu, hasil simulasi numerik pada beberapa titik pemantauan juga menunjukkan hasil yang kurang akurat. Nilai RMSPE hasil simulasi numerik terhadap hasil pengukuran NO₂ pada periode kuadrimester pertama tahun 2022 sebesar 54,81%.

Gambar 4 menunjukkan hasil solusi numerik sebaran NO₂ disekitar lokasi penelitian pada kuadrimester kedua (Mei – Agustus 2022). Konsentrasi maksimum NO₂ hasil kegiatan pengangkutan batubara dilokasi penelitian diperkirakan sebesar 39,3 µg/m³. Gas NO₂ menyebar ke segala arah dengan titik konsentrasi tinggi sebaran NO₂ berada pada area sekitar jalan angkut.



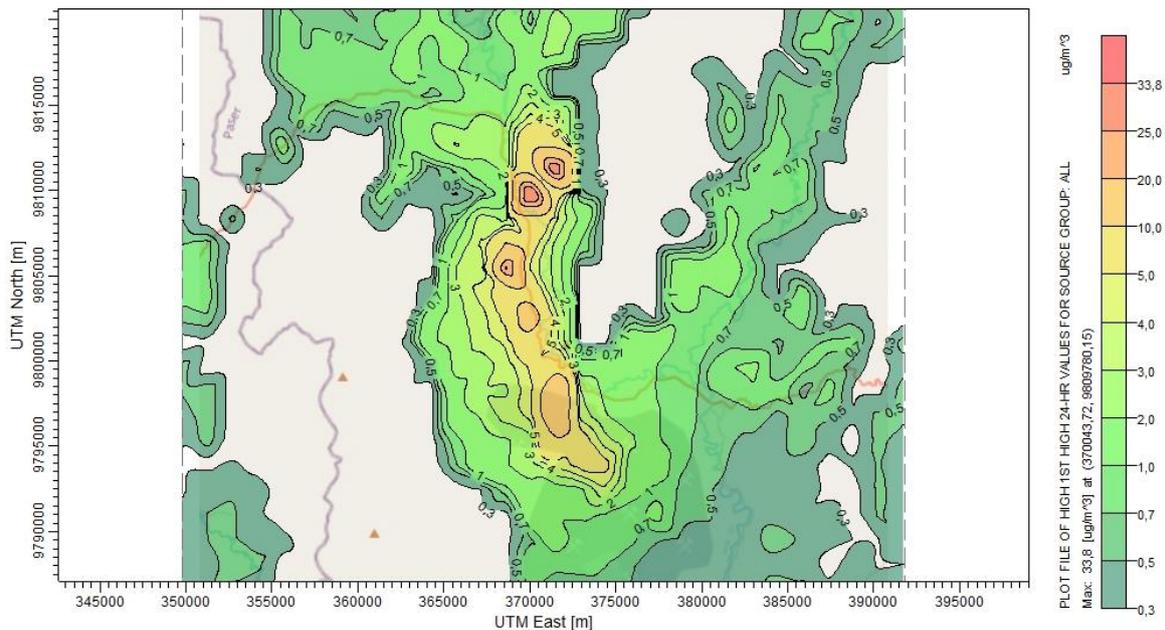
Gambar 4. Hasil simulasi sebaran NO₂ periode 24 jam pada lokasi penelitian dalam kuadrimester kedua 2022

Tabel 2. Perbandingan hasil pemantauan dengan hasil simulasi numerik pada periode kuadrimester kedua tahun 2022.

Titik Lokasi	Koordinat		Hasil Pemantauan	Hasil Simulasi	Nilai RMSPE
	S	E			
U-01	01° 43' 33,4"	115° 49' 47,8"	7,06	30	46,84%
U-02	01° 40' 34,8"	115° 49' 10,1"	10,83	4	
U-03	01° 48' 25,1"	115° 50' 14,9"	5,33	7	
U-04	01° 43' 47,3"	115° 49' 36,0"	9,58	20	
U-05	01° 43' 02,4"	115° 49' 50,6"	6,94	39	
U-06	01° 44' 33,9"	115° 49' 52,9"	6,18	7	
U-07	01° 43' 43,1"	115° 50' 10,3"	5,97	20	
U-08	01° 41' 31,4"	115° 49' 36,6"	8,88	6	
U-09	01° 44' 42,2"	115° 49' 13,9"	9,7	10	
U-10	01° 42' 23,9"	115° 49' 29,9"	7,66	5	

Nilai RMSPE solusi numerik periode kuadrimester kedua tahun 2022 terhadap hasil pemantauan sebesar 46,84%. Tingkat akurasi solusi numerik pada periode kuadrimester kedua sedikit lebih

baik dibandingkan dengan akurasi pada kuadrimester pertama. Perbandingan hasil simulasi numerik terhadap hasil pemantauan pada periode kuadrimester kedua dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 5. Hasil simulasi sebaran NO₂ periode 24 jam pada lokasi penelitian dalam kuadrimester ketiga 2022

Konsentrasi NO₂ pada lokasi penelitian dalam periode kuadrimester ketiga (September – Desember 2022) dapat dilihat pada Gambar 5. Konsentrasi maksimum sebaran NO₂ berada pada sekitar jalan hauling pengangkutan batubara. Konsentrasi maksimum NO₂ yang dihasilkan dari kegiatan

pengangkutan batubara diperkirakan sebesar 33,8 µg/m³ yang menyebar disekitar jalan angkut. Tingkat akurasi hasil solusi numerik pada kuadrimester ketiga tidak lebih baik dibandingkan dengan hasil pada periode kuadrimester pertama dan kedua. Nilai RMSPE solusi numerik terhadap hasil pemantauan dalam periode kuadrimester

ketiga sebesar 60,96%. Nilai RMSPE untuk periode kuadrimester ketiga dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan hasil pemantauan dengan hasil simulasi numerik pada periode kuadrimester ketiga tahun 2022.

Titik Lokasi	Koordinat		Hasil Pemantauan	Hasil Simulasi	Nilai RMSPE
	S	E			
U-01	01° 43' 33,4"	115° 49' 47,8"	5,29	30	60,96%
U-02	01° 40' 34,8"	115° 49' 10,1"	10,42	2	
U-03	01° 48' 25,1"	115° 50' 14,9"	5,19	7	
U-04	01° 43' 47,3"	115° 49' 36,0"	10,86	20	
U-05	01° 43' 02,4"	115° 49' 50,6"	7,11	30	
U-06	01° 44' 33,9"	115° 49' 52,9"	5,63	7	
U-07	01° 43' 43,1"	115° 50' 10,3"	5,9	20	
U-08	01° 41' 31,4"	115° 49' 36,6"	7,59	7	
U-09	01° 44' 42,2"	115° 49' 13,9"	9,91	9	
U-10	01° 42' 23,9"	115° 49' 29,9"	5,44	6	

Kesimpulan

Gas NO₂ dapat menimbulkan gangguan kesehatan kepada manusia hingga kematian. Emisi gas NO₂ berasal dari dump truk yang digunakan dalam kegiatan pengangkutan batubara yang melalui jalan hauling sepanjang 21,14 km. Emisi ini menyebar ke area sekitar lokasi penelitian di Kecamatan Batu Sopang, Kalimantan Timur. Pemodelan sebaran NO₂ dilakukan menggunakan model AERMOD untuk melihat area dan tingkat sebaran. Laju emisi dari kegiatan pengangkutan batubara sebesar 3,74 g/s. Data meteorologi pada lokasi penelitian memberikan arah angin dominan tahun 2022 berhembus ke arah timur dan barat laut dengan kecepatan antara 0,5 – 2,1 m/s. Kecepatan angin rata-rata lokasi penelitian sebesar 0,61 m/s.

Simulasi numerik dibagi dalam 3 periode kuadrimester yang divalidasi dengan data hasil pemantauan pada 10 titik disekitar lokasi penelitian. Tingkat akurasi model dihitung dengan menentukan besaran persentase galat menggunakan *Root Mean Square Percent Error* (RMSPE). Nilai RMSPE hasil pemodelan terhadap data pemantauan pada periode kuadrimester pertama sebesar 54,81%. Pada periode kuadrimester kedua dan ketiga diperoleh nilai galat masing-masing sebesar 46,84% dan 60,96%. Tingkat

akurasi hasil numerik pada kuadrimester kedua sedikit lebih baik dibandingkan dengan dua periode kuadrimester lainnya.

Daftar Pustaka

- Shakulwisut, P., Brauer, M., Hystad, P., & Anenberg, S. C. (2019). Global, national, and urban burdens of paediatric asthma incidence attributable to ambient NO₂ pollution: estimates from global datasets. *The Lancet Planetary Health*, 3(4), e166–e178. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30046-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30046-4)
- Kariyeh, M. H., Kota, S. H., Vallamsundar, S., Zietsman, J., & Ying, Q. (2017). AERMOD for near-road pollutant dispersion: Evaluation of model performance with different emission source representations and low wind options. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57, 392–402. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.008>
- Statistik Kab. Paser. (2023). *Kecamatan Batu Sopang Dalam Angka 2023*. Badan Pusat Statistik Kabupaten Paser.
- Urrutia, D. C., Farren, N. J., Vaughan, A. R., Drysdale, W. S., Young, S., & Lee, J. D. (2019). The diminishing importance of nitrogen dioxide emissions from road vehicle exhaust. *Atmospheric Environment: X*, 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2018.100002>

- Chen, T.-M., Kuschner, W. G., Gokhale, J., & Shofer, S. (2007). Outdoor Air Pollution: Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide, and Carbon Monoxide Health Effects. *The American Journal of the Medical Sciences*, 333(4), 249–256. <https://doi.org/10.1097/MAJ.0b013e31803b900f>
- Cimorelli, A. J., Perry, S. G., Venkatram, A., Weil, J. C., Paine, R. J., Wilson, R. B., & Paumier. (2004). *AERMOD: description of model formulation*.
- Gibson, M. D., Kundu, S., & Satish, M. (2013). Dispersion model evaluation of PM_{2.5}, NO_x and SO₂ from point and major line sources in Nova Scotia, Canada using AERMOD Gaussian plume air dispersion model. *Atmospheric Pollution Research*, 4(2), 157–167. <https://doi.org/10.5094/APR.2013.016>
- Hall, D. L., Anderson, D. C., Martin, C. R., Ren, X., Salawitch, R. J., He, H., Canty, T. P., Hains, J. C., & Dickerson, R. R. (2020). Using near-road observations of CO, NO_y, and CO₂ to investigate emissions from vehicles: Evidence for an impact of ambient temperature and specific humidity. *Atmospheric Environment*, 232, 117558. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117558>
- Heinrich, J., Thiering, E., Rzehak, P., Krämer, U., Hochadel, M., Rauchfuss, K. M., Gehring, U., & Wichmann, H.-E. (2013). Long-term exposure to NO₂ and PM₁₀ and all-cause and cause-specific mortality in a prospective cohort of women. *Occupational and Environmental Medicine*, 70(3), 179–186. <https://doi.org/10.1136/oemed-2012-100876>
- Hvidtfeldt, U. A., Sørensen, M., Geels, C., Ketzel, M., Khan, J., Tjønneland, A., Overvad, K., Brandt, J., & Raaschou-Nielsen, O. (2019). Long-term residential exposure to PM_{2.5}, PM₁₀, black carbon, NO₂, and ozone and mortality in a Danish cohort. *Environment International*, 123, 265–272. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.010>
- nkunda, E., Török, Z., Mereuță, A., Gasore, J., Kalisa, E., Akimpaye, B., Habineza, T., Shyaka, O., Munyampundu, G., & Ozunu, A. (2022). The comparison between in-situ monitored data and modelled results of nitrogen dioxide (NO₂): case-study, road networks of Kigali city, Rwanda. *Heliyon*, 8(12), e12390. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12390>
- Li, X., Fiore, A., Boersma, K. F., Smedt, I. De, & Valin, L. (2020). Inferring Changes in Summertime Surface Ozone–NO_x–VOC Chemistry over U.S. Urban Areas from Two Decades of Satellite and Ground-Based Observations. *Environmental Science & Technology*, 54(11), 6518–6529. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07785>
- Perry, S. G., Cimorelli, A. J., Paine, R. J., Brode, R. W., Weil, J. C., Venkatram, A., Wilson, R. B., Lee, R. F., & Peters, W. D. (2005). AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part II: Model Performance against 17 Field Study Databases. *Journal of Applied Meteorology*, 44(5), 694–708. <https://doi.org/10.1175/JAM2228.1>
- Prangkiatiyuth, K., Surapipith, V., Tantrakarnapa, K., & Lothongkum, A. W. (2011). Application of the AERMOD modeling system for environmental impact assessment of NO₂ emissions from a cement complex. *Journal of Environmental Sciences*, 23(6), 931–940. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60499-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60499-8)
- Wang, Z., Lu, K., Dong, H., Hu, M., Li, X., Liu, Y., Lu, S., Shao, M., Su, R., Wang, H., Wu, Y., Wahner, A., & Zhang, Y. (2018). Explicit diagnosis of the local ozone production rate and the ozone-NO_x-VOC sensitivities. *Science Bulletin*, 63(16), 1067–1076. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.07.001>