

Pemodelan Pola Persebaran Emisi NO_x Dari Pembakaran Kiln Industri Keramik di Mojokerto Menggunakan Software GRAL (*Graz Lagrangian Model*)

Ahmad Nazil Stalis¹ dan Okik Hendriyanto Cahyonugroho²

^{1,2} Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran”
Jawa Timur

*Correspondence author: okikhc@upnjatim.ac.id

Received: 10 October 2023; Accepted: 17 March 2025; Published: 31 May 2025

Abstract

The continuous expansion of industrial activities has a significant impact on air quality, primarily due to exhaust gas emissions from production processes. One of the industrial sectors contributing to air pollution is the ceramics industry, which releases nitrogen oxide (NO_x) emissions through the kiln combustion process. This study aims to analyze the dispersion pattern of NO_x emissions around the ceramics industry as an effort to understand the environmental impact. NO_x concentration was selected as the main parameter because it serves as a significant indicator in assessing air quality. The research data consists of primary data obtained through laboratory testing of kiln stack emissions and secondary data in the form of meteorological information sourced from NASA Power. The GRAL (Graz Lagrangian Model) software was chosen for this study to examine the emission dispersion pattern. GRAL was selected due to its ability to model pollutant dispersion by considering wind speed and direction. The study results indicate that NO_x disperses according to atmospheric dynamics, with the highest concentration of 36.1 µg/m³ recorded at point 1 and the lowest at 1.4 µg/m³ at point 4. All monitoring points remain below the ambient air quality standard of 200 µg/m³, indicating that emissions from this industry have not exceeded the regulatory threshold. This study confirms that kiln combustion contributes to the deterioration of air quality, although it has not yet reached hazardous levels. The emission dispersion pattern can be mapped more accurately, providing insights for industrial emission monitoring and control by utilizing GRAL modeling. These findings can also serve as a foundation for more effective environmental policies aimed at reducing air pollution impacts.

Keywords: GRAL, ceramic industry, wind speed, wind direction, kiln, dispersion, NO_x.

Abstrak

Aktivitas industri yang terus berkembang memberikan dampak signifikan terhadap kualitas udara, terutama akibat emisi gas buang dari proses produksi. Salah satu sektor industri yang berkontribusi terhadap pencemaran udara adalah industri keramik, dimana industri ini melepaskan emisi nitrogen oksida (NO_x) melalui proses pembakaran kiln. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola persebaran emisi NO_x di sekitar industri keramik sebagai upaya memahami dampak lingkungan yang ditimbulkan. Konsentrasi NO_x dipilih sebagai parameter utama karena merupakan indikator signifikan dalam menilai kualitas udara. Data

penelitian terdiri dari data primer yang diperoleh melalui pengujian laboratorium terhadap emisi cerobong kiln, serta data sekunder berupa informasi meteorologi yang diambil dari NASA Power. Untuk meneliti pola sebaran emisi, *software* GRAL (*Graz Lagrangian Model*) dipilih dalam penelitian. GRAL dipilih karena mampu menggambarkan dispersi polutan dengan mempertimbangkan faktor kecepatan dan arah angin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa NO_x tersebar sesuai dengan dinamika atmosfer, dengan konsentrasi tertinggi sebesar 36,1 µg/m³ di titik 1 dan terendah 1,4 µg/m³ di titik 4. Seluruh titik pemantauan masih di bawah baku mutu udara ambien 200 µg/m³, menunjukkan bahwa emisi dari industri ini belum melebihi ambang batas. Penelitian ini menegaskan bahwa pembakaran kiln berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara, meskipun belum mencapai tingkat berbahaya. Dengan pemodelan GRAL, pola penyebaran emisi dapat dipetakan secara lebih akurat, memberikan wawasan bagi pemantauan dan pengendalian emisi industri. Hasil ini juga dapat menjadi dasar kebijakan lingkungan yang lebih efektif dalam mengurangi dampak pencemaran udara.

Kata kunci: GRAL, industri keramik, kecepatan angin, arah angin, kiln, persebaran, NO_x

1. Pendahuluan

Udara menjadi komponen penting bagi kehidupan manusia. Namun, seiring berjalannya waktu kualitas udara yang baik semakin berkurang, sementara kebutuhan akan udara bersih terus meningkat seiring pertumbuhan populasi (1). Salah satu penyebab utama penurunan kualitas udara adalah aktivitas industri yang meningkatkan konsumsi energi dan menghasilkan polusi udara (2).

Perkembangan industri mendorong pemanfaatan sumber daya alam secara intensif untuk memenuhi kebutuhan manusia melalui teknologi modern. Meskipun meningkatkan efisiensi produksi, industri juga membutuhkan energi besar dan menghasilkan limbah, termasuk polusi udara (3). Sumber utama pencemaran udara industri berasal dari cerobong asap di sektor pertambangan dan semen, yang melepaskan partikulat dan gas berbahaya (3).

Industri keramik di Mojokerto merupakan salah satu sektor yang menggunakan proses pembakaran dalam produksinya, dengan bahan bakar utama berupa gas alam. Emisi dari cerobong kiln menyebar ke atmosfer dan mempengaruhi kualitas udara ambien, terutama melalui pelepasan nitrogen dioksida (NO₂). Emisi dari cerobong asap ini selanjutnya akan tersebar ke atmosfer dan terdispersi yang mengakibatkan adanya penurunan kualitas udara ambien. Proses dispersi gas ini sangat dipengaruhi oleh kondisi meteorologi seperti kecepatan angin, arah angin, dan kelembapan serta kondisi wilayah disekitarnya sehingga kondisi meteorologi turut memberikan kontribusi dalam persebaran emisi udara (4).

NO_x adalah gabungan antara nitrogen oksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO₂). Proses utama dalam pembentukan NO₂ di atmosfer terjadi melalui oksidasi NO. NO_x berfungsi

sebagai pencetus dalam pembentukan ozon (O_3) dan hujan asam. Selain itu, NO_x juga mampu mengalami reaksi dengan komponen lain di udara untuk membentuk partikulat (*particulate matter* – PM). Formasi NO_x terjadi ketika bahan bakar terbakar pada suhu tinggi. NO_2 adalah salah satu zat pencemar yang muncul akibat dari proses pembakaran. Umumnya, spesies NO_x berwujud gas yang tak berwarna dan tak berbau, namun, NO_2 adalah pengecualian, terutama di wilayah perkotaan, di mana keberadaannya dapat terlihat sebagai lapisan kabut berwarna coklat di langit (5).

NO_x memiliki efek negatif terhadap kesehatan, termasuk dampak seperti gangguan pernapasan, peradangan pada paru-paru (*pneumonia*), dan bahkan dapat menyebabkan kematian. Oksida nitrogen yang terdapat dalam udara dapat membentuk partikel-partikel oksida nitrogen yang sangat kecil, seperti nitrat, yang dapat dengan mudah masuk ke dalam jaringan sensitif paru-paru. Hal ini dapat menyebabkan atau memperburuk penyakit pernapasan, seperti bronkitis dan emfisema. Orang yang memiliki kesehatan yang baik mungkin tidak akan terpengaruh oleh paparan NO_x pada konsentrasi rendah. Namun, individu yang menderita asma atau penyakit pernapasan lainnya lebih rentan terhadap dampak NO_x karena dapat menyebabkan penyempitan saluran napas (5).

Dalam mengetahui penyebaran emisi NO_x , diperlukan *software* yang membantu pemetaan penyebaran emisi polutan, salah satu *software* yang digunakan adalah model GRAL (*Graz Lagrangian Model*). Pemodelan ini dapat memberikan gambaran konsentrasi dan pola penyebaran emisi, sehingga sebaran polutan dapat diprediksi sebagai bahan evaluasi bahaya polutan dari kegiatan produksi. Model GRAL ini dapat memperhitungkan peta kualitas udara pada suatu kota dengan sistem perhitungan dari emisi dari lalu lintas, pemanasan domestik, industri besar, tenaga, serta panas dari titik sumber pembangkit yang secara horizontal dengan resolusi antara 5 m dan 10 m, dimana berdasarkan parameter meteorologi nyata dengan periode tertentu (6). Model ini juga mempertimbangkan topografi, jenis permukaan, serta struktur bangunan dalam simulasi dispersi partikel polutan. Pemodelan dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi awal meteorologi, seperti kecepatan dan arah angin serta stabilisasi atmosfer (7). Dengan berdasarkan hal-hal tersebut, *software* ini dipilih karena kecocokannya dalam mensimulasikan daerah dengan dinamika atmosfer kompleks yang tidak dapat dilakukan *software* lain seperti AERMOD.

Penelitian ini menganalisis pola persebaran emisi NO_x di sekitar industri keramik menggunakan pemodelan GRAL. Data kualitas udara dikaji berdasarkan konsentrasi NO_x sebagai indikator utama polusi. Hasil pemodelan dibandingkan dengan standar yang ditetapkan

dalam Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup untuk mengevaluasi dampak industri terhadap lingkungan sekitar (8).

Penelitian ini memberikan kontribusi unik dengan menerapkan pemodelan GRAL untuk menganalisis dispersi NO_x di industri keramik yang masih jarang mendapatkan perhatian dalam studi pencemaran udara. Selain itu, penggunaan data meteorologi jangka panjang dapat meningkatkan akurasi pemetaan pola penyebaran emisi gas yang diteliti. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi industri dan regulator dalam mengelola dampak lingkungan dari emisi gas NO_x secara lebih efektif.

2. Metode

2.1. Lokasi dan Data

Penelitian ini dilakukan di industri keramik yang berlokasi di Kecamatan Ngoro, Kabupaten Mojokerto. Pengumpulan data primer dilakukan melalui pengukuran emisi NO_x dari cerobong kiln secara manual menggunakan laboratorium penguji sebanyak 1 kali persemester (4 bulan pertama 2023). Pengukuran dilakukan pada ketinggian cerobong sesuai dengan standar yang telah ditetapkan, dengan metode IKA-52 (Direct Reading) sebagai teknik pengukuran emisi NO_x .

Selain data primer, penelitian ini juga menggunakan data sekunder berupa parameter meteorologi, termasuk arah angin, kecepatan angin, dan stabilitas atmosfer, yang diperoleh dari database NASA Power sesuai dengan koordinat lokasi cerobong kiln. Data meteorologi dikumpulkan setiap satu jam selama periode satu bulan, dari 12 Juni hingga 12 Juli 2023. Rentang waktu ini dipilih untuk menangkap variasi kondisi atmosfer yang beragam, mencakup perbedaan pola angin harian serta potensi perubahan stabilitas atmosfer akibat faktor cuaca. Dengan pengambilan data secara kontinu selama satu bulan, penelitian ini dapat lebih akurat dalam merepresentasikan dinamika dispersi NO_x dalam berbagai kondisi meteorologi yang mungkin terjadi di lokasi penelitian.

2.2. Pengolahan Data

Pada penelitian ini sumber data konsentrasi NO_x cukup terbatas dan hanya didapatkan dari titik pemantauan tertentu, sedangkan distribusi gas NO_x terjadi secara kontinyu di seluruh wilayah studi. Untuk melengkapi keterbatasan tersebut, dalam pemodelan penyebaran polutan menggunakan *software* GRAL, akan dilakukan interpolasi konsentrasi NO_x . Interpolasi akan membantu memperkirakan konsentrasi di lokasi lain dengan mempertimbangkan pola

penyebaran dari sumber emisi dan dinamika atmosfer. Selain itu, data diolah dengan mempertimbangkan kenaikan kecepatan angin. Analisis data dengan melibatkan pola perubahan kecepatan angin dilakukan untuk mendapatkan gambaran yang lebih akurat tentang dampak gas NO_x yang dikeluarkan oleh industri keramik terhadap lingkungan sekitar.

3. Hasil penelitian

3.1. Data Emisi Cerobong Kiln

Pada penelitian ini data yang dibutuhkan yaitu data pemantauan cerobong kiln yang dilakukan sebanyak 2 kali dalam 1 tahun. Data tersebut diperoleh dari data pengujian laboratorium uji. Selain data pengujian data spesifikasi cerobong penting sebagai penentuan laju beban emisi.

Tabel 1. Data Pemantauan Cerobong Kiln Semester 1 Tahun 2023

Keterangan	Nilai Pengukuran	Satuan
Konsentrasi NO _x	51	(mg/Nm ³)
Suhu Gas Buang	41,5	(°C)
Kecepatan Gas Buang	11,35	(m/s)
Tinggi cerobong	15	(m)
Diameter cerobong	1	(m)
Luas Penampang	0,785 m ²	(m ²)

Setelah diperoleh data konsentrasi NO_x yang keluar dari cerobong dan spesifikasi cerobong pada tabel 1. dapat ditentukan laju emisi NO_x yang dikeluarkan dari cerobong kiln.

Tabel 2. Laju Emisi Cerobong Kiln Semester 1 Tahun 2023

Keterangan	Nilai Pengukuran	Satuan
(C) Konsentrasi NO _x	51	(mg/Nm ³)
(Q) Laju Alir Emisi	8,92	(m ³ /s)
Op Hours	4398	(jam)
(E) Laju Emisi NO _x	7.202,65	(kg/tahun)
Laju Emisi NO _x	0,822	(kg/jam)

3.2. Data Model Software GRAL

Penentuan data model diperlukan sebagai batas pemodelan pada *software* GRAL, batasan model dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Pengaturan Data Model

Keterangan	Nilai Model
Topografi	Medan datar
Rintangan	Tidak ada
Konsentrasi grid	Horizontal 10 m, ekstensi vertical 1 m, 1 m di atas permukaan tanah
Model Domain	2000 m x 2000 m
Jumlah Partikel	180.000 per jam
Panjang	0,2 m
Kekasaran	

3.3. Data Persebaran dan Konsentrasi Emisi NO_x

Pada penelitian ini didapatkan hasil *running* pada *software* GRAL berupa data arah persebaran dan konsentrasi persebaran emisi NO_x serta penentuan jarak persebaran yang diukur dari sumber emisi NO_x pada cerobong kiln.

Tabel 4. Persebaran Konsentrasi Emisi NO_x

Titik Pantauan	Jarak dari Cerobong (m)	Arah Angin	Konsentrasi NO _x (µg/m ³)
1	350	Barat Laut	36,1
2	1020	Barat Laut	13,6
3	1925	Barat Laut	5,7
4	1345	Utara	1,4
5	310	Timur	26
6	1250	Timur Laut	6,5
7	2790	Timur Laut	1,7
8	550	Tenggara	8,4
9	1500	Tenggara	1,9
10	2700	Timur	1,5

Setelah diketahui konsentrasi pada titik pemantauan kemudian dilakukan identifikasi tata guna lahan pada titik pemantauan. Data tata guna lahan dapat dilihat pada table 4. dibawah.

Tabel 4. Persebaran Konsentrasi Emisi NO_x

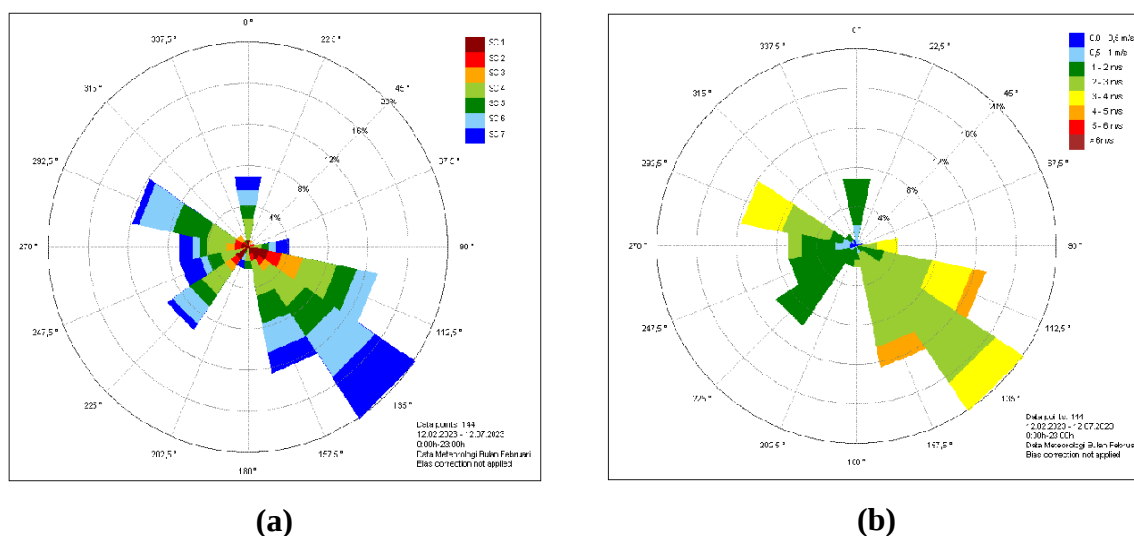
Titik Pantauan	Konsentrasi NO _x (µg/m ³)	Penggunaan Lahan
1	36,1	Kawasan industri
2	13,6	Kawasan industri
3	5,7	Pemukiman
4	1,4	Kawasan industri
5	26	Kawasan industri

6	6,5	Kawasan industri
7	1,7	Pemukiman
8	8,4	Kawasan industri
9	1,9	Pemukiman
10	1,5	Pemukiman

4. Pembahasan

4.1. Kondisi Meteorologi Sekitar Wilayah Studi

Kondisi meteorologi di sekitar industri keramik di Kecamatan Ngoro Kabupaten Mojokerto yang diproyeksikan menggunakan *Software* GRAL sehingga menghasilkan *wind rose* yang dapat dilihat pada Gambar 1. Kondisi meteorologi yang di proyeksikan yaitu arah dan kecepatan angin selama 6 bulan terhitung sejak bulan Februari-Juli 2023. Arah angin berdasarkan gambar *wind rose* menunjukkan arah angin yang mengarah dominan ke barat laut sebesar 11,8%, barat daya sebesar 9,7%, dan tenggara sebesar 45,8%. Arah angin yang paling sering yaitu menuju tenggara dengan rentang kecepatan angin berkisar antara 2-3 m/s.



Gambar 1. (a) *Wind Rose* Arus Angin Bulan Februari-Juli 2023, (b) *Wind Rose* Distribusi Kecepatan Angin Bulan Februari-Juli 2023

Meskipun kondisi meteorologi memiliki peran penting dalam dispersi gas NO_x, tetapi kondisi topografi dan faktor lingkungan sekitar juga turut andil dalam dispersi gas NO_x tersebut. Kecamatan Ngoro memiliki karakteristik topografi yang relatif datar dengan beberapa kawasan berbukit di sekitarnya, yang dapat mempengaruhi pergerakan massa udara dan pola turbulensi atmosfer. Selain itu, keberadaan bangunan industri, pemukiman, serta vegetasi juga berperan dalam membentuk pola dispersi NO_x. Struktur perkotaan dan keberadaan hambatan fisik seperti bangunan tinggi atau kompleks industri, dapat menyebabkan *blocking effect* dan

turbulensi lokal yang berkontribusi terhadap akumulasi polutan di area tertentu atau perubahan arah aliran udara pada skala mikro. Oleh karena itu, analisis pola penyebaran yang mempertimbangkan interaksi antara faktor meteorologi, topografi, dan struktur buatan sangat penting untuk memahami karakteristik dispersi emisi NO_x di wilayah studi ini

4.2. Hasil Pengolahan Data Emisi Cerobong Kiln

Hasil pemantauan emisi cerobong kiln Semester 1 Tahun 2023, nilai konsentrasi NO_x sebesar 51 mg/Nm³, Suhu Gas Buang 41,5 °C, dan Kecepatan Gas Buang 11,35 m/s. Untuk deskripsi cerobong kiln, tinggi cerobong sebesar 15 m, diameter cerobong 1 m, dan luas penampang cerobong 0,785 m². Pada pemantauan emisi selama satu semester dihitung selama 6 bulan dari periode bulan Februari sampai dengan bulan Juli 2023.

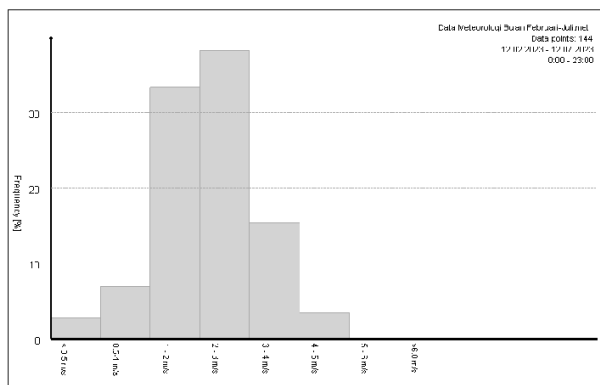
Berdasarkan Peraturan Menteri Negara LH No. 17 Tahun 2008 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Keramik hasil konsentrasi NO_x pada cerobong kiln yang telah dilakukan pengukuran memiliki nilai konsentrasi yang berada di bawah baku mutu yaitu sebesar 51 mg/Nm³ dimana nilai baku mutu yang ditetapkan yaitu sebesar 600 mg/Nm³. Nilai konsentrasi yang berada jauh dibawah baku mutu di pengaruhi oleh penggunaan bahan bakar yang menggunakan natural gas, dimana natural gas dalam proses pembakarannya tidak banyak melepaskan emisi gas NO_x.

Nilai dari kecepatan gas buang (*v*) dan konsentrasi (*C*) polutan didapatkan dari hasil pemantauan yang dilakukan oleh laboratorium penguji (pihak ke 3). Berdasarkan nilai pemantauan yang didapatkan kemudian dihitung laju emisi dalam satuan kg/tahun dan dikonversi menjadi kg/jam, didapatkan nilai laju emisi sebesar 0,822 kg/jam. Konversi laju emisi menjadi satuan kg/jam dilakukan untuk kemudian dimasukkan ke dalam *Software* GRAL

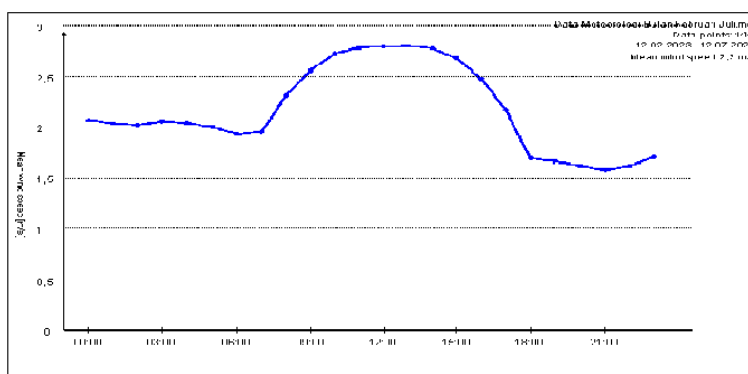
4.3. Kecepatan Angin Rata-Rata pada Ketinggian Cerobong

Nilai kecepatan angin yang diukur selama 6 bulan dari bulan Februari-Juli 2023 yang diambil dari *website* NASA Power dan berdasarkan hasil *running* menunjukkan adanya persebaran kecepatan angin yang dapat dilihat pada Gambar 2. Hasil menunjukkan dimana kecepatan angin berkisar antara 0-5 m/s, dengan nilai persebaran kecepatan angin <0,5 m/s memiliki presentase sebesar 2,8%, kecepatan angin 0,5-1 m/s memiliki presentase sebesar 7%, kecepatan angin 1-2 m/s memiliki presentase sebesar 33,4%, kecepatan angin 2-3 m/s memiliki presentase sebesar 39,7%, kecepatan angin 3-4 m/s memiliki presentase sebesar 14%,

kecepatan angin 4-5 m/s memiliki presentase sebesar 3,5%. Dari data variasi kecepatan angin yang didapatkan menunjukkan kecepatan angin yang paling sering berhembus di lokasi studi yaitu kecepatan angin sebesar 2-3 m/s hal ini mengindikasikan bahwa kondisi arus angin memiliki keadaan yang cenderung stabil.



Gambar 2. Presentase Kecepatan Angin Selama Bulan Februari-Juli 2023

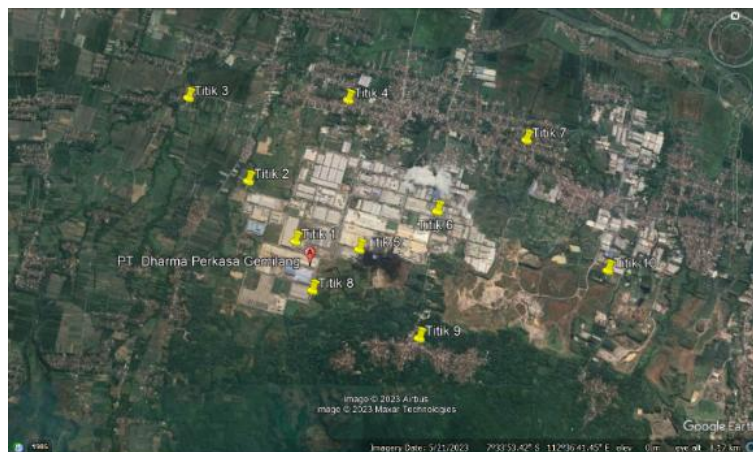


Gambar 3. Kecepatan Angin pada Interval Waktu Per Jam

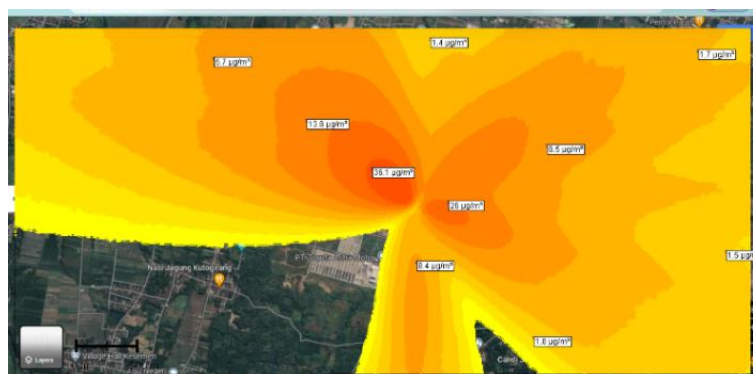
Berdasarkan Gambar 2. dan Gambar 3. menunjukkan kesinambungan data dimana kecepatan rata-rata berkisar antara 2-3 m/s, dimana kecepatan angin cenderung stabil pada pukul 00:00-06:00 WIB dan mengalami kenaikan pada pukul 09:00 WIB dan pada kecepatan puncak terjadi pada siang hari yaitu pukul 12:00 WIB dan kembali mengalami penurunan kecepatan angin dari pukul 18:00-21:00 WIB.

4.4. Peta Persebaran dan Konsentrasi Emisi NO_x

Peta persebaran emisi NO_x yang diproyeksikan dari sumber emisi cerobong kiln dengan proyeksi persebaran ketinggian 10 m dari atas permukaan tanah. Dari peta persebaran NO_x dapat dilihat arah persebaran polutan dan dapat ditentukan konsentrasi emisi pada titik tertentu, data persebaran konsentrasi emisi NO_x dapat dilihat pada gambar di bawah:



Gambar 4. Peta Penentuan Titik Pemantauan Persebaran Emisi NO_x



Gambar 5. Peta Persebaran Emisi NO_x pada Titik Pemantauan

Analisis persebaran konsentrasi NO_x dilakukan dengan menentukan titik pemantauan melalui peta persebaran yang telah dilakukan permodelan persebaran menggunakan GRAL. Data titik pemantauan ditentukan sebanyak 10 titik dengan jarak yang diukur dari sumber emisi NO_x dikeluarkan selain itu dianalisis juga dari titik pemantauan arah angin dari sumber emisi NO_x beberapa arah mata angin diantaranya barat laut, utara, timur, timur laut, dan tenggara. Setelah diketahui konsentrasi NO_x pada arah angin dan jarak tertentu kemudian dilakukan perbandingan terhadap baku mutu yang berlaku.

Hasil pemantauan konsentrasi emisi NO_x pada 10 titik menunjukkan variasi nilai, dengan konsentrasi tertinggi sebesar $36,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan terendah sebesar $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, serta nilai lainnya masing-masing $13,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $6,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $8,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dan $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Variasi konsentrasi ini sangat dipengaruhi oleh faktor meteorologi khususnya kecepatan dan arah angin, sebagaimana dinyatakan dalam penelitian Puspa Dewi, *et al.* (2018) yang menunjukkan bahwa kondisi udara memiliki pengaruh dominan terhadap pola dispersi NO_x . Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, lampiran

VII, nilai baku mutu udara ambien untuk emisi NO_x ditetapkan sebesar 200 µg/m³. Hasil pemantauan menunjukkan bahwa seluruh titik pengukuran memiliki konsentrasi yang jauh di bawah ambang batas yang telah ditentukan, sehingga dapat disimpulkan bahwa emisi NO_x di lokasi penelitian masih berada dalam batas aman menurut regulasi yang berlaku.

Hasil konsentrasi yang memiliki nilai tertinggi yaitu sebesar 36,1 µg /m³ dengan jarak dari sumber emisi sejauh 350 m dan arah angin ke arah barat laut konsentrasi NO_x pada titik 1 memiliki nilai yang tinggi dibandingkan dengan titik pantauan lainnya dikarenakan pada titik 1 memiliki jarak yang dekat dengan sumber pencemar NO_x serta kecepatan angin yang cenderung lemah sehingga konsentrasi NO_x terakumulasi pada titik tersebut.

Hasil konsentrasi terendah yaitu pada titik 4 dimana konsentrasi NO_x sebesar 1,4 µg /m³ dengan jarak pada sumber pencemar NO_x sejauh 1345 m dan arah angin ke arah utara. Konsentrasi NO_x rendah dibandingkan dengan titik pemantauan lainnya karena dipengaruhi oleh adanya arah angin dan kecepatan angin yang mengarah ke utara, dimana arah angin yang menuju ke utara relatif rendah sehingga konsentrasi pada titik tersebut memiliki nilai konsentrasi NO_x yang rendah pula.

Meskipun secara keseluruhan hasil pemodelan menunjukkan data konsentrasi emisi gas NO_x dibawah baku mutu, akan tetapi keberadaan gas ini masih memiliki potensi memberikan dampak buruk bagi kesehatan. Salah satu upaya yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan ini yaitu dengan merubah penggunaan bahan bakar yang semula dengan bahan bakar alternatif berbahan dasar hidrogen atau biomassa. Dengan penggantian bahan bakar tersebut, diharapkan dapat menekan gas NO_x yang dihasilkan dari proses pembakaran. Selain itu, optimalisasi proses pembakaran dengan sistem pembakaran bertahap (*staged combustion*) atau penggunaan teknologi pembakaran pada suhu lebih rendah juga dapat membantu menekan pembentukan gas NO_x.

4.5. Persebaran NO_x dan Tata Guna Lahan Titik Pemantauan

Berdasarkan titik pemantauan persebaran emisi NO_x kemudian dianalisis pada titik pemantauan berdasarkan jenis guna lahan. Berdasarkan data pada tabel 4. menunjukan variasi lahan pada titik pemantauan berupa kawasan industri dan pemukiman dimana pada kawasan industri ditunjukkan pada titik pemantauan titik 1, 2, 4, 5, 6, dan 8, dan penggunaan lahan pemukiman ditunjukkan pada titik pemantauan 3, 7, 9, dan 10. Dari data tersebut nilai konsentrasi NO_x yang memiliki nilai konsentrasi yang tinggi cenderung terdapat di kawasan industri dan sebaliknya konsentrasi NO_x cenderung memiliki nilai yang relatif rendah.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa dampak persebaran emisi NO_x pada pemukiman atau perumahan tidak terlalu besar atau relatif aman.

4.6. Keterbatasan Studi

Dalam penelitian ini terdapat keterbatasan studi yaitu ketergantungan pada data meteorologi dari sumber sekunder (NASA Power) yang memiliki resolusi ruang yang terbatas dan mungkin tidak sepenuhnya dapat mencerminkan kondisi iklim mikro di lokasi studi. Selain itu, frekuensi pengambilan data emisi dari cerobong yang dilakukan dalam jumlah terbatas tidak dapat menunjukkan variabilitas gas NO_x yang dihasilkan sepanjang waktu. Kesalahan dalam input data seperti kecepatan gas buang atau laju aliran emisi juga dapat memengaruhi akurasi hasil pemodelan. Oleh karena itu studi lanjutan dengan resolusi data yang lebih tinggi, pengukuran emisi yang lebih sering, serta validasi hasil model dengan data lapangan tambahan perlu dilakukan untuk meningkatkan akurasi prediksi pola penyebaran NO_x .

5. Kesimpulan

Berdasarkan data topografi yang telah dianalisis arah angin berdasarkan gambar *wind rose* menunjukkan arah angin yang mengarah paling dominan yaitu ke arah tenggara dengan presentase sebesar 45,8%. Kecepatan angin mengalami kenaikan secara konstan pada pukul 09:00 WIB dan kembali melandai pada pukul 18:00 WIB. Kecepatan angin stabil di rentang 2-3 m/s. Pengukuran konsentrasi emisi NO_x pada cerobong kiln sebesar 51 mg/Nm^3 nilai tersebut jika dibandingkan dengan baku mutu yang telah ditentukan berada jauh dibawahnya, dimana nilai baku mutu yang ditentukan yaitu sebesar 600 mg/Nm^3 . Dari data konsentrasi emisi NO_x dari pengukuran laboratorium kemudian didapatkan nilai beban emisi sebesar 7.202,65 kg/tahun atau sama dengan 0,822 kg/jam. Pemantauan pada 10 titik yang telah ditentukan memiliki nilai dibawah baku mutu udara ambien yaitu sebesar 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nilai konsentrasi tertinggi terjadi di titik 1 dengan nilai konsentrasi NO_x sebesar 36,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan konsentrasi terendah terjadi di titik 4 yaitu sebesar 1,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dengan titik pemantauan yang dilakukan dengan memperhatikan tata guna lahan di area studi dengan kesimpulan bahwa konsentrasi emisi NO_x yang relatif rendah yaitu pada area pemukiman.

6. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan dari hasil studi ini antara lain,

1. Bagi peneliti, diperlukan penelitian lanjutan dengan resolusi data yang lebih tinggi, pengukuran emisi yang lebih sering, serta validasi hasil model dengan data lapangan tambahan untuk meningkatkan akurasi prediksi pola penyebaran NO_x.
2. Bagi pelaku industri, optimalisasi proses pembakaran dan penggunaan bahan bakar yang lebih ramah lingkungan dapat menjadi langkah strategis untuk mengurangi emisi secara signifikan tanpa mengurangi efisiensi produksi. Industri juga disarankan untuk meningkatkan sistem pemantauan emisi secara berkala guna memastikan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan yang berlaku.
3. Bagi legislator, diperlukan evaluasi terkait peningkatan sistem pemantauan kualitas udara berbasis teknologi digital dapat membantu dalam pengawasan dan evaluasi dampak emisi terhadap lingkungan secara lebih akurat dan transparan.

Daftar Pustaka

1. Ismahani, R., & Kunci, K. (2022). *Pemodelan AERMOD Untuk Proyeksi Pola Penyebaran Emisi*. 11(2), 51–63. <https://doi.org/10.15294/ijc.v11i2.37953>
2. Handriyono, R. E., & Kusuma, M. N. (2017). Kajian Beban Emisi SO₂ dan NO_x Dari Kegiatan Industri Di Kawasan Industri Sier Surabaya. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 3(2), 41–46. <https://doi.org/10.20527/jukung.v3i2.4026>
3. Handriyono, R. E., & Kusuma, M. N. (2017). Kajian Beban Emisi SO₂ dan Nox Dari Kegiatan Industri Di Kawasan Industri Sier Surabaya. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 3(2), 41–46. <https://doi.org/10.20527/jukung.v3i2.4026>
4. Dispersi, P., Udara, E., Dan, S. O., Dengan, N. O., Jawa, M., Kartanegara, K. K., Sarwono, E., Adnan, F., & Rafi, M. M. (2021). *Menggunakan Persamaan Gaussian Pada Cerobong Pltu*. 5(2), 17–34.
5. Kementerian Lingkungan Hidup. (2013). Pedoman Teknis Penyusunan Inventarisasi Emisi Pencemar Udara di Perkotaan. Pedoman Teknis Penyusunan Inventarisasi Emisi Pencemar Udara Di Perkotaan.
6. Indonesia. (2008). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 17 Tahun 2008 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Keramik.
7. Romanov, A. A., Gusev, B. A., Leonenko, E. V., Tamarovskaya, A. N., Vasiliev, A. S., Zaytcev, N. E., & Philippov, I. K. (2020). Graz Lagrangian Model (Gral) for Pollutants Tracking And Estimating Sources Partial Contributions To Atmospheric Pollution In

- Highly Urbanized Areas. *Atmosphere*, 11(12), 1–26.
<https://doi.org/10.3390/atmos11121375>
8. Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021. Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
 9. Puspa Dewi, N. W. S., June, T., Yani, M., & Mujito. (2018). Estimasi pola dispersi debu, SO₂ dan NO_x dari industri semen menggunakan model Gauss yang diintegrasikan dengan SCREEN3. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 8(1), 109-119.
<https://doi.org/10.29244/jpsl.8.1.109-119>