

Pemodelan Sebaran Polutan Udara dari *Flarestack* Menggunakan AERMOD di *Onshore Receiving Facilities* PT X

Mochammad Yordan Royan Futari*, Munawar Ali

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: mochammadyordanroyanfutari@gmail.com

Diterima: 28 November 2024

Disetujui: 4 Desember 2024

Abstract

This study aims to model the dispersion of air emissions (NO_x and SO_2) from the flarestack at the Onshore Receiving Facilities (ORF) of PT X using AERMOD software. Wind patterns affecting the emission distribution were analysed using WRPLOT View software. The modelling results were verified with ambient air quality measurements to ensure accuracy and reliability. The windrose analysis showed that wind directions shifted between semesters: west-to-east in semester I and east-to-west in semester II of 2023, affecting the dispersion patterns. Isopleth maps showed that NO_x and SO_2 concentrations remained stable, with maximum concentrations of $0.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $0.028 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. Concentrations of both pollutants complied with Indonesia's air quality standards (Government Regulation No. 22/2021). However, actual ambient measurements showed higher concentrations due to external sources not included in the model. These results highlight the important role of meteorological factors in emission dispersion and the need for comprehensive pollution control strategies.

Keywords: *air dispersion modeling, AERMOD, flarestack, NO_x and SO_2 , windrose analysis, ambient air quality*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan sebaran emisi udara (NO_x dan SO_2) dari *flarestack* di *Onshore Receiving Facilities* (ORF) PT X menggunakan perangkat lunak AERMOD. Pola angin yang memengaruhi distribusi emisi dianalisis menggunakan perangkat lunak WRPLOT View. Hasil pemodelan diverifikasi dengan pengukuran kualitas udara ambien untuk memastikan akurasi dan keandalan. Analisis windrose menunjukkan pergeseran arah angin antara semester: dari barat ke timur pada Semester I dan dari timur ke barat pada Semester II tahun 2023, memengaruhi pola sebaran emisi. Peta isopleth menunjukkan konsentrasi NO_x dan SO_2 stabil dengan maksimum masing-masing $0,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan $0,028 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Konsentrasi kedua polutan ini memenuhi baku mutu udara ambien Indonesia (PP No. 22/2021). Namun, pengukuran aktual menunjukkan konsentrasi lebih tinggi akibat sumber lain yang tidak diperhitungkan dalam model. Temuan ini menegaskan peran signifikan faktor meteorologi dalam sebaran emisi dan pentingnya strategi pengendalian pencemaran yang komprehensif.

Kata Kunci: *pemodelan sebaran udara, AERMOD, flarestack, NO_x dan SO_2 , analisis windrose, kualitas udara ambien*

1. Pendahuluan

Permintaan energi global terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan ekonomi dunia. Berdasarkan prediksi International Energy Agency (IEA), kebutuhan energi global diperkirakan tumbuh sebesar 45% selama periode 2006 hingga 2030, dengan rata-rata kenaikan tahunan sekitar 1,6%. Hingga saat ini, bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam tetap menjadi sumber utama untuk memenuhi kebutuhan energi tersebut [1].

Gas alam termasuk sumber energi cadangan terbesar ketiga di dunia setelah batu bara dan minyak bumi [2]. Dengan karakteristiknya yang efisien dan lebih ramah lingkungan, gas alam telah menjadi salah satu sumber energi yang banyak dimanfaatkan secara global [3]. Salah satu fasilitas yang mendukung distribusi gas alam adalah *Onshore Receiving Facilities* (ORF), yaitu fasilitas penerimaan dan distribusi gas alam dari kilang di tengah laut menuju daratan. Fasilitas ini sering dilengkapi dengan vent tower atau *flarestack* [4].

Flarestack adalah alat pembakaran berbentuk vertikal yang digunakan untuk membakar gas limbah yang tidak dapat dimanfaatkan atau diangkut. Selain itu, *flarestack* juga berfungsi sebagai sistem keamanan, di mana pembakaran dilakukan untuk mengurangi tekanan gas melalui pressure relief valve jika diperlukan

[5]. Meskipun bermanfaat dalam pengelolaan limbah gas, pembakaran pada *flarestack* tetap menghasilkan emisi yang berkontribusi pada pencemaran lingkungan dan pemanasan global [6].

Aktivitas industri gas alam sering kali mengeluarkan emisi berupa gas rumah kaca (GRK), seperti CO₂, CH₄, dan N₂O, serta polutan udara seperti NO_x dan SO₂ [7]. Berdasarkan PerMen LH No. 12 Tahun 2012 tentang Pedoman Perhitungan Beban Emisi Kegiatan Industri Minyak dan Gas Bumi, emisi tersebut meliputi gas NO_x, CO, SO₂, dan/atau partikulat yang dilepaskan ke udara ambien, baik yang mengandung maupun tidak mengandung unsur pencemar [8]. Selanjutnya, Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 menjelaskan bahwa pencemaran udara terjadi akibat masuknya atau dilepaskannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien sebagai dampak aktivitas manusia, sehingga melebihi baku mutu udara ambien yang telah ditentukan [9].

Emisi dominan yang dihasilkan dari operasional *Onshore Receiving Facilities* (ORF) PT X berasal dari pembakaran pada *flarestack*, berupa gas pencemar seperti NO_x dan SO₂ [10]. Jenis zat pencemar tersebut dapat berdampak pada lingkungan sekitar, terutama masyarakat yang tinggal di sekitar ORF, dengan potensi polutan yang terdispersi di udara ambien. Polutan ini tidak hanya berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara tetapi juga dapat menyebabkan fenomena seperti hujan asam. Lokasi penelitian ini dilakukan di fasilitas ORF PT X, sehingga penelitian difokuskan pada dua jenis emisi utama, yaitu NO_x dan SO₂. Oleh sebab itu, diperlukan langkah pengelolaan terhadap gas-gas pencemar tersebut. Salah satu cara untuk mengidentifikasi tingkat pencemaran udara ambien adalah dengan memprediksi pola distribusi gas pencemar melalui pemodelan kualitas udara..

AERMOD adalah perangkat lunak berbasis model Gaussian plume yang direkomendasikan oleh US EPA untuk simulasi kualitas udara [11] [12]. AERMOD memiliki keunggulan dibandingkan perangkat lain seperti AUSTAL 2000, karena kemampuan untuk mengolah data meteorologi yang lebih komprehensif, termasuk data PBL [13], serta dapat mempertimbangkan topografi lokasi penelitian, bahkan di area dengan kontur yang kompleks seperti pegunungan [14].

AERMOD bekerja sebagai sistem pemodelan dispersi atmosfer yang mencakup tiga komponen utama: pengolahan data arah dan kecepatan angin (WRPLOT View), pengolahan data meteorologi (AERMET View), dan pengolahan data topografi (AERMAP). Dengan pendekatan Gaussian dan bi-Gaussian, AERMOD mampu menghasilkan estimasi konsentrasi polutan di udara ambien secara akurat. Perangkat ini dapat digunakan untuk memodelkan emisi di berbagai jenis area, baik perkotaan maupun pedesaan, sehingga sangat fleksibel untuk berbagai kebutuhan simulasi kualitas udara [15].

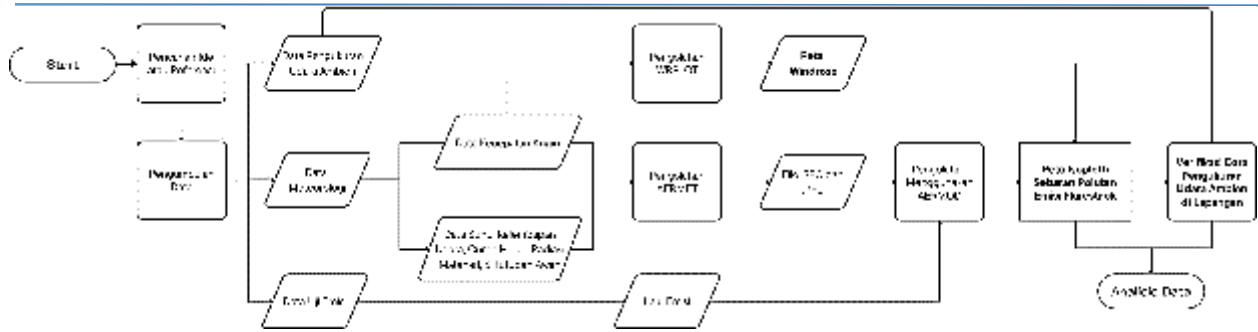
Penelitian ini bertujuan untuk memetakan pola penyebaran emisi udara berupa NO_x dan SO₂ di wilayah *Onshore Receiving Facilities* (ORF) PT X dengan menggunakan perangkat lunak AERMOD sebagai alat pemodelan utama. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis pola sebaran arah angin yang memengaruhi distribusi emisi tersebut dengan menggunakan perangkat lunak WRPLOT View. Hasil pemodelan data AERMOD kemudian divalidasi dengan hasil uji udara ambien untuk memastikan akurasi dan keandalan simulasi yang dihasilkan dalam menggambarkan kondisi nyata di lapangan.

2. Metode Penelitian

Metode dan Pengambilan Data Penelitian

Penelitian ini menerapkan metode penelitian deskriptif yang bertujuan untuk menilai kondisi serta pelaksanaan program terkait kualitas udara saat ini, sekaligus memberikan masukan untuk perbaikan di masa mendatang. Tahapan penelitian meliputi studi pustaka, pengumpulan informasi, pengolahan data, analisis hasil, dan penarikan kesimpulan.

Penelitian ini memanfaatkan data sekunder berupa hasil pengujian emisi yang tercantum dalam laporan RKL-RPL PT X untuk Semester I dan II tahun 2023. Data tersebut mencakup periode Januari hingga Juni 2023 (Semester I) serta Juli hingga Desember 2023 (Semester II), yang telah diverifikasi oleh pihak terkait. Desain penelitian dijelaskan lebih lanjut pada bagian berikut.



Gambar 1. Alur Desain Penelitian
Sumber: Data Pribadi (2024)

Berdasarkan alur desain penelitian yang ditampilkan pada Gambar 1., penelitian ini diawali dengan identifikasi ide dan pengumpulan referensi yang relevan. Tahapan selanjutnya dilakukan pengumpulan data, termasuk data meteorologi yang diperoleh dari website Visual Crossing, dengan mempertimbangkan berbagai parameter meteorologi, seperti suhu udara, tutupan awan rendah, curah hujan, tekanan udara, arah dan kecepatan angin, intensitas radiasi matahari, serta ketinggian awan rendah. Selain itu, data uji emisi diperoleh dari hasil pengukuran yang dilakukan oleh PT X sebagai data penunjang utama. Data meteorologi yang telah dikumpulkan kemudian diproses dengan perangkat lunak AERMET untuk menghasilkan file PFL dan SFC yang berfungsi sebagai input dalam pemodelan. Selanjutnya, data uji emisi dihitung untuk mendapatkan laju emisi yang akurat. Data laju emisi ini bersama file PFL dan SFC diolah menggunakan perangkat lunak AERMOD untuk menghasilkan peta pemodelan yang memprediksi pola sebaran emisi dari *flarestack* di *Onshore Receiving Facilities* (ORF). Hasil peta pemodelan yang diperoleh dari AERMOD kemudian diverifikasi dengan data pengukuran udara ambien di lapangan yang dilakukan oleh PT X. Proses verifikasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil simulasi pemodelan sesuai dengan kondisi nyata di lokasi penelitian.

Lokasi Penelitian dan Titik Sampling Udara Ambien

Lokasi penelitian berada di *Onshore Receiving Facilities* (ORF) milik PT X, yang berlokasi di Desa Permisian, Kecamatan Jabon, Kabupaten Sidoarjo. Proses pengukuran emisi di *flarestack* dilakukan langsung oleh PT X untuk mendapatkan data sumber emisi yang akurat. Selain itu, pengujian kualitas udara ambien di sekitar wilayah ORF juga dilakukan oleh PT X untuk mengetahui kondisi kualitas udara di area sekitar fasilitas. Berikut adalah lokasi sumber emisi *flarestack* di ORF PT X dan titik sampling udara ambien:



Gambar 2. Lokasi Penelitian
Sumber: Data Penelitian Pribadi (2024)

Tabel 1. Lokasi Titik Sampling Udara Ambien

No.	Lokasi Titik Pemantauan	Titik Koordinat	
		X	Y
1	Sekitar Genset ORF (Sampling 1)	692885	9166083
2	Sekitar Pos Sekuriti ORF (Sampling 2)	692875	9166040

Sumber: Data Penelitian Pribadi (2024)

Data Emisi dan Spesifikasi Flarestack

Data emisi yang dipakai dalam penelitian ini berasal dari hasil pengukuran emisi di *flarestack* ORF PT X, sebagaimana tercantum dalam Laporan RKL - RPL Semester I dan II Tahun 2023. Selain itu, untuk melengkapi analisis, data spesifikasi *flarestack* PT X yang meliputi Tinggi, diameter serta parameter teknis lainnya juga digunakan dalam penelitian ini.. Berikut adalah data emisi dari *flarestack* ORF PT X yang menjadi fokus analisis dalam penelitian ini.

Tabel 2. Data Emisi dan Spesifikasi Cerobong *Flarestack* ORF

Judul	Keterangan	Satuan
Koordinat UTM	x = 693052.05, y = 9166363.51	-
Tinggi Cerobong	60	m
Diameter Cerobong	0.6	m
Suhu	1000	Kelvin
Laju Alir Gas Buang	0.104	m/s
Konsentrasi NO _x	0.315	ton/tahun
Konsentrasi SO ₂	0.03	ton/tahun

Sumber: Data PT X 2023

Data Meteorologi

Data meteorologi yang dirujuk dalam penelitian ini didapatkan dari Stasiun Meteorologi Kelas I Juanda, yang merupakan stasiun meteorologi terdekat dengan lokasi *Onshore Receiving Facilities* (ORF) PT X. Data tersebut diakses melalui website www.visualcrossing.com. Data meteorologi yang dikumpulkan meliputi berbagai parameter sesuai format yang tercantum pada **Tabel 3**. Data ini merupakan hasil pengukuran per jam yang tercatat selama periode Januari hingga Juni 2023 (Semester I) serta Juli hingga Desember 2023 (Semester II) 2023. Selanjutnya, data meteorologi tersebut diolah menggunakan MS Excel untuk pengelompokan dan pembersihan data sebelum diterapkan dalam AERMET.

Tabel 3. Format Input pada AERMET View

Parameter	Kolom	Nilai yang diizinkan	Satuan
Tahun	A	-	-
Bulan	B	1 – 12	-
Tanggal	C	1 – 31	-
Jam	D	1 – 24	-
Tutupan Awan	E	0 – 10	Tenth
Temperatur Udara	F	-70 – 60	°C
Kelembapan Udara	G	0 – 100	%
Tekanan Udara	H	700 – 1,100	Mb
Arah Angin	I	0 – 360	Derajat
Kecepatan Angin	J	0 – 99	ms ⁻¹
Tinggi Awan Rendah	K	0 – 30,450	m
Curah Hujan	L	0 – 100	Mm
Radiasi Matahari	M	0 – 1,415	Whm ⁻²

Sumber: Software AERMET View (2024)

Data Topografi / Terrain

Peta kontur atau data topografi dimanfaatkan sebagai dasar untuk analisis area penelitian. Data ini diambil dari situs www.webgis.com dan mencakup informasi ketinggian yang sesuai dengan koordinat lokasi penelitian dalam lingkup global.Format data yang digunakan adalah hgt, yang secara langsung terintegrasi dengan AERMAP. Untuk keperluan studi ini, digunakan data SRTM 3 dengan resolusi 90 meter dalam cakupan global. Pemilihan data SRTM 3 didasarkan pada resolusinya yang cukup detail untuk

mendukung analisis terrain dalam sistem AERMOD. SRTM 3 adalah data elevasi dengan resolusi tinggi yang merepresentasikan topografi bumi secara global. SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) adalah sistem yang dipasang pada Pesawat Ulang-Alik milik NASA. Sistem ini mengumpulkan data permukaan bumi menggunakan teknologi radar aperture sintetis (*Synthetic Aperture Radar*) dalam penginderaan jauh. Data yang diperoleh dari misi ini dikonversi menjadi Digital Elevation Model (DEM), yaitu model elevasi digital yang memungkinkan pembuatan peta tiga dimensi dengan tingkat akurasi tinggi dari wilayah tertentu di bumi. Resolusi tinggi data SRTM, yaitu 90 meter, memberikan keuntungan besar dalam pemodelan. Selain itu, data ini bersifat open source dan telah dikonversi ke format hgt, sehingga mudah digunakan dalam aplikasi.

Dalam pemodelan dispersi atmosfer, informasi elevasi permukaan di wilayah sekitar sangat penting, karena perbedaan elevasi dapat memengaruhi konsentrasi polutan di setiap reseptor. AERMAP digunakan untuk menetapkan elevasi medan yang relevan dengan pengaruh dispersi dan lokasi reseptor, memastikan hasil pemodelan yang lebih akurat.

Metode Pengolahan Data

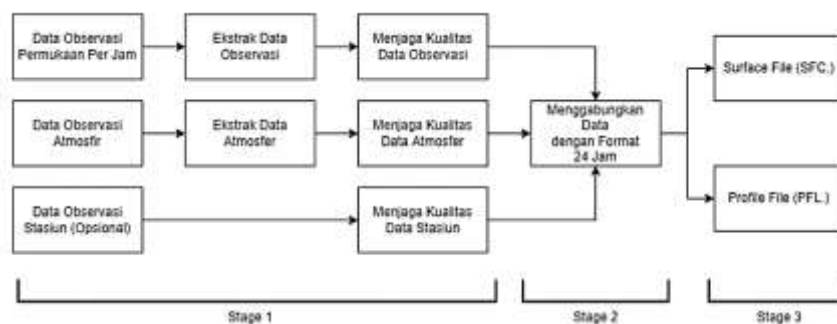
Penelitian ini memanfaatkan data sekunder yang meliputi perhitungan hasil uji emisi dari cerobong *flarestack* selama periode Januari hingga Desember 2023, data meteorologi yang diperoleh melalui Visual Crossing Weather API, serta data topografi yang diakses melalui situs webgis.

Konversi Satuan Laju Emisi

Area ORF PT X memiliki satu cerobong *flarestack* yang berfungsi sebagai sumber utama emisi. Parameter emisi yang diukur pada cerobong ini meliputi SO₂ dan NO₂ dalam satuan konsentrasi ton/tahun. Untuk mempersiapkan data tersebut dalam perangkat lunak AERMOD, diperlukan konversi satuan emisi dari ton/tahun menjadi g/s agar sesuai dengan format yang digunakan dalam simulasi.

Pengolahan Data Meteorologi dengan AERMET View

Data meteorologi yang diperoleh dari situs Visual Crossing akan diproses menggunakan perangkat lunak AERMET. Pemrosesan data meteorologi dalam AERMET melibatkan beberapa tahapan yang harus dilalui untuk memastikan data siap digunakan.



Gambar 3. Pengolahan Data Menggunakan AERMET View

Sumber: Ismahani, R., & Anurogo, W. (2022)

Pada tahap awal, data observasi atmosfer dan data observasi permukaan diekstraksi dan dilakukan pemeriksaan kualitasnya. Proses ini melibatkan perhitungan sejumlah parameter, seperti arah dan kecepatan angin, suhu udara kering yang tidak dipengaruhi oleh radiasi matahari, kelembapan udara, serta tutupan awan. Setelah melalui tahap ini, data tersebut dilanjutkan ke tahap kedua, di mana semua informasi digabungkan ke dalam file intermediate dengan format 24 jam. Pada tahap akhir, file intermediate tersebut diproses untuk memilih parameter *boundary layer* yang diperlukan dalam analisis dispersi. Hasil akhir dari proses ini adalah file *surface* (.sfc) dan *profile* (.pfl), yang kemudian digunakan sebagai data masukan utama untuk analisis di perangkat lunak AERMOD.

Pengolahan Data Topografi / Terrain dengan AERMAP

Proses pengolahan data topografi dilakukan memanfaatkan perangkat lunak AERMAP. AERMAP digunakan untuk mengidentifikasi elevasi medan yang diamati dan menentukan posisi reseptor sebelum data diolah lebih lanjut dalam AERMOD. Dalam proses analisis topografi wilayah, AERMAP menghitung

elevasi permukaan di bawah reseptor dan sumber emisi, serta skala elevasi pada setiap reseptor yang terpengaruh oleh pelepasan emisi dari *flarestack*.

Data topografi yang digunakan berupa model elevasi digital (DEM) dalam format hgt, yang diunduh dari *website* resmi webgis. Data yang dipilih adalah SRTM 3 Global dengan resolusi memadai untuk cakupan wilayah studi. Hasil pengolahan data ini digunakan sebagai *basemap* atau acuan topografi dalam analisis wilayah kajian. Setiap koordinat lokasi penelitian ditampilkan dengan kontur elevasi yang diwakili oleh perbedaan warna. Data yang telah diolah selanjutnya digunakan sebagai peta dasar untuk membandingkan dan memvisualisasikan ruang lingkup penelitian.

Pengolahan Data dengan AERMOD

Setelah data meteorologi dan topografi selesai diproses, langkah selanjutnya adalah mengolah data tersebut menggunakan perangkat lunak AERMOD. Proses ini dimulai dengan membuat proyek baru di AERMOD, memberikan nama proyek, dan menyimpan file tersebut. Penelitian ini menggunakan sistem koordinat Universal Transverse Mercator (UTM) dengan datum World Geodetic System (WGS) 1984 sebagai acuan. Titik acuan wilayah analisis ditentukan pada *northwest corner*, di mana nilai koordinat (X dan Y) serta dimensi wilayah kajian dimasukkan. Data topografi yang telah terhubung ke AERMOD menghasilkan *basemap* dengan informasi ketinggian yang ditampilkan sebagai kontur warna. Wilayah kajian dalam penelitian ini tergolong *flat terrain* karena memiliki permukaan tanah yang relatif datar.

File profil (.pfl) dan surface (.sfc) data meteorologi yang sebelumnya diolah dalam AERMET dilengkapi dengan informasi stasiun, seperti ID, nama, dan koordinat stasiun. Selain itu, reseptor untuk analisis penyebaran polutan dipilih berdasarkan lokasi dengan konsentrasi emisi tertinggi. Reseptor yang digunakan dalam penelitian ini berjenis Uniform Cartesian Grid (UCARTI), dengan rincian koordinat titik awal, ukuran grid, jumlah grid, dan dimensi wilayah kajian. Tahap berikutnya adalah pengaturan *Control Pathway*. Beberapa parameter penting dimasukkan pada tahap ini, seperti jenis polutan (NO_x dan SO_2), jangka waktu analisis (1 jam, 24 jam, hingga 1 bulan), dan opsi keluaran berupa nilai konsentrasi polutan. Setelah semua data terinput, perangkat lunak AERMOD dijalankan. Jika jendela status menunjukkan *Project Complete*, simulasi dispersi emisi dapat dilakukan.

Hasil akhir dari AERMOD berupa peta simulasi penyebaran emisi dengan garis iso-konsentrasi yang divisualisasikan dalam berbagai warna. Setiap warna mewakili rentang konsentrasi emisi tertentu, menggambarkan pola penyebaran polutan dari sumber emisi *flarestack*.

Pengolahan Data dengan WRPLOT View

Pengolahan data arah dan kecepatan angin dilakukan menggunakan perangkat lunak WRPLOT View. Data tersebut diproses menjadi peta windrose yang menunjukkan distribusi arah dan kecepatan angin dari berbagai arah mata angin di wilayah penelitian selama periode pengamatan tertentu. Peta *windrose* ini memberikan gambaran tentang pola penyebaran arah dan intensitas angin yang berkontribusi terhadap distribusi partikel emisi yang dihasilkan oleh *flarestack*. Data angin tersebut kemudian dikonversi ke dalam format (.sam) dan diolah mengoperasikan perangkat lunak WRPLOT View.

Analisis dan Penyajian Data

Penelitian ini menerapkan metode analisis deskriptif, yang melibatkan beberapa tahap, seperti tabulasi data, analisis emisi, analisis arah angin yang memengaruhi penyebaran polutan, serta pemetaan hasil sebaran. Data disajikan dalam berbagai bentuk, termasuk angka, gambar, peta, dan tabel yang relevan dengan objek penelitian:

1. Peta Pola Penyebaran Konsentrasi Emisi

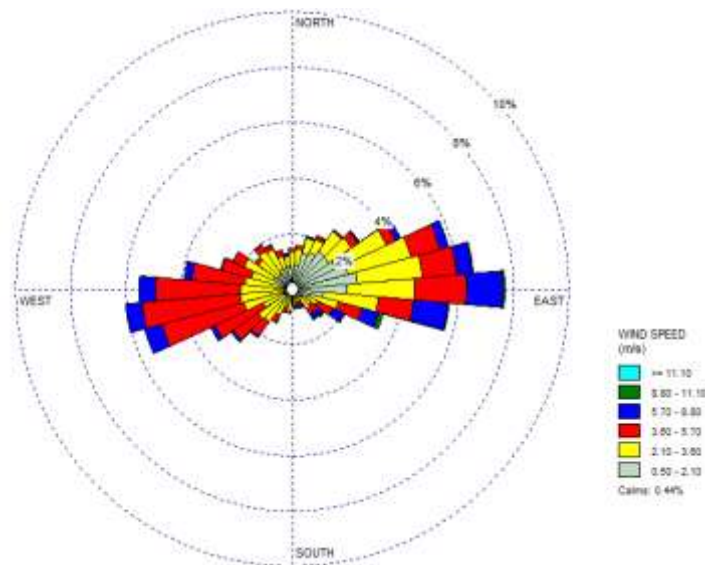
Hasil penyebaran emisi disajikan dalam bentuk peta isopleth yang menggambarkan pola dispersi emisi NO_x dan SO_2 dari *flarestack* ORF PT X. Pemodelan ini menggunakan pendekatan Gaussian Plume untuk menganalisis pola penyebaran emisi.

2. Peta Mawar Angin / Windrose

Menyajikan peta hasil analisis arah dan kecepatan angin, membantu menggambarkan pola dominan dispersi angin yang membawa partikel emisi. Peta ini juga dilengkapi skala untuk mengklasifikasikan kecepatan angin sesuai data yang diperoleh.

3. Hasil dan Pembahasan

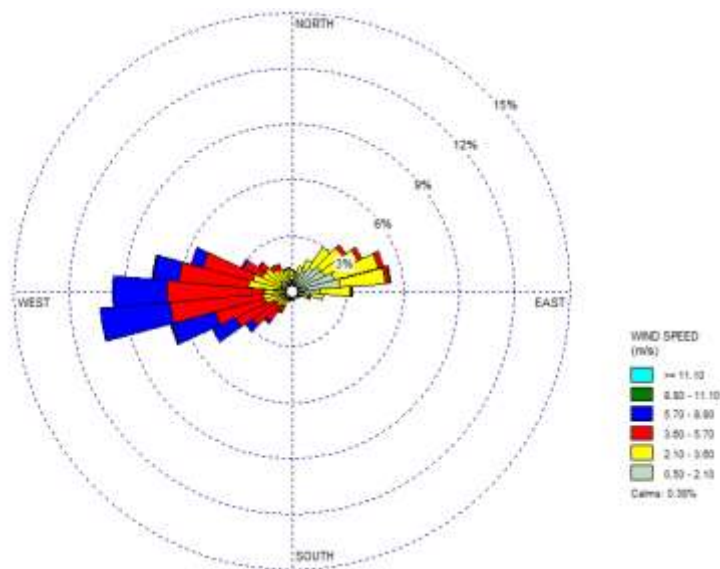
Peta Windrose



Gambar 4. Peta Windrose Semester I (Januari - Juni) Tahun 2023

Sumber: Data Penelitian Pribadi (2024)

Gambar 4. menggambarkan arah dan kecepatan angin selama Semester I tahun 2023 di lokasi pengamatan. Berdasarkan peta windrose, angin dominan bergerak dari barat ke timur dengan kecepatan rata-rata sebesar 3,27 m/s dengan suhu lingkungan 81,86 °F . Kecepatan maksimum tercatat pada rentang 5,70–8,80 m/s dengan frekuensi sebesar 7,2%. Frekuensi angin tertinggi terjadi pada kondisi calm wind dengan rentang kecepatan 0,5–2,1 m/s, yang mencapai 34,6% dari total pengamatan. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar angin yang terpantau selama periode ini bergerak dengan kecepatan rendah, sehingga dapat memengaruhi pola penyebaran emisi secara signifikan.



Gambar 5. Peta Windrose Semester II (Juli - Desember) Tahun 2023

Sumber: Data Penelitian Pribadi (2024)

Gambar 5. menampilkan pola arah dan kecepatan angin pada Semester II tahun 2023 di lokasi kajian. Selama periode ini, arah angin dominan berbalik dari timur ke barat dengan kecepatan rata-rata tertinggi sebesar 3,54 m/s dengan suhu lingkungan 82,67 °F. Kecepatan maksimum angin berada pada rentang 5,70–8,80 m/s dengan frekuensi mencapai 6,5%. Frekuensi angin tertinggi terjadi pada rentang kecepatan 2,1–3,60 m/s, yaitu sebesar 33,6%. Kondisi calm wind, di mana kecepatan angin berada di bawah

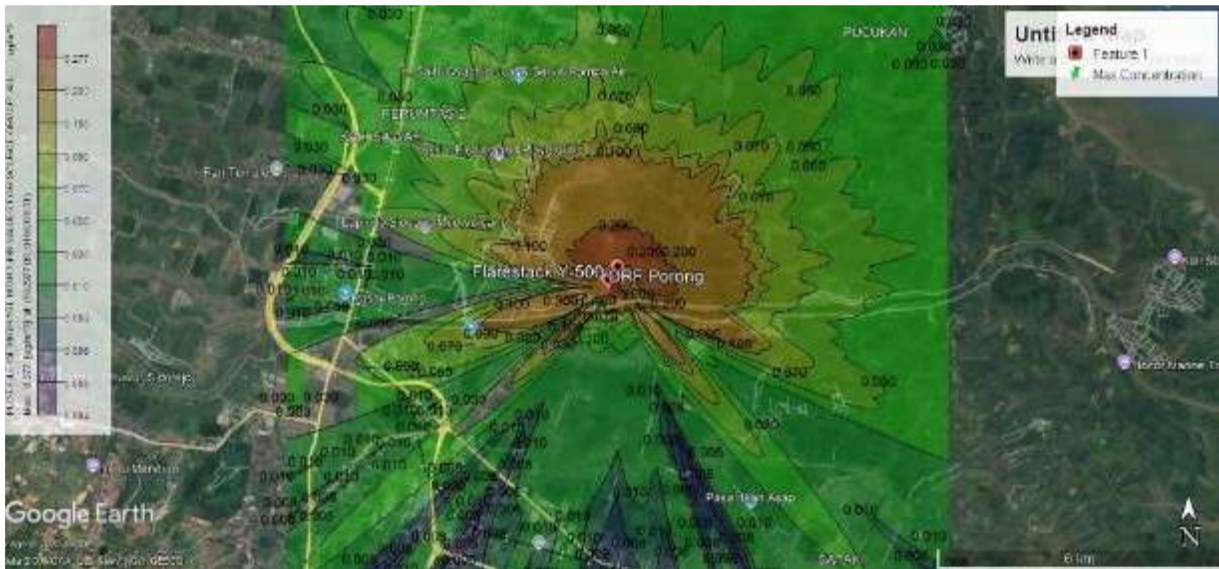
1,0 m/s, tercatat sebesar 32,6%. Pola ini menunjukkan adanya perbedaan arah dominasi angin antar semester, yang berpotensi memengaruhi pola penyebaran emisi dari sumber kajian.

Dari hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa pola pergerakan angin di wilayah ORF PT. X menunjukkan perubahan yang konsisten setiap semester. Pada Semester I tahun 2023, arah angin dominan bergerak dari barat ke timur, sedangkan pada Semester II tahun 2023, arah angin bergeser berlawanan, yaitu dari timur ke barat. Selain perubahan arah, kecepatan angin juga menunjukkan peningkatan, dengan kecepatan tertinggi tercatat pada Semester II sebesar 3,54 m/s.

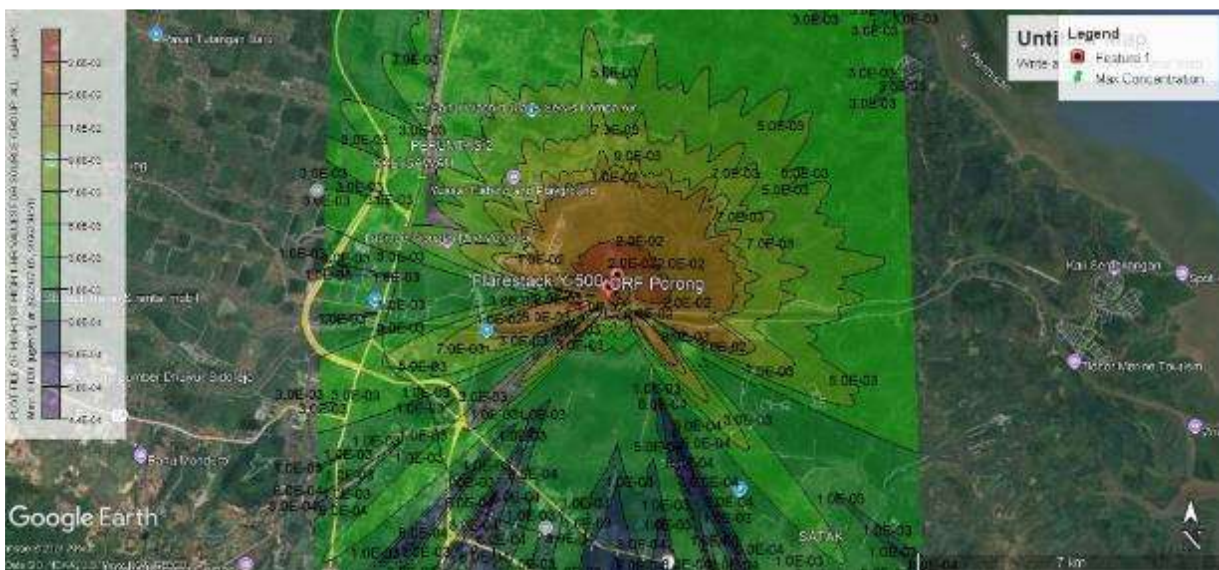
Pola pergerakan angin dan variasi kecepatannya berperan penting dalam analisis dispersi emisi, karena memengaruhi arah dan luas sebaran polutan di sekitar area ORF PT. X. Hasil ini menggarisbawahi pentingnya mempertimbangkan faktor meteorologi dalam evaluasi kualitas udara.

Hasil Pemodelan Sebaran Emisi NO_x dan SO₂

Gambar 6 menampilkan peta isopleth konsentrasi NO_x di wilayah ORF PT X selama Semester I tahun 2023. Berdasarkan peta tersebut, titik konsentrasi tertinggi NO_x teridentifikasi pada koordinat (692977 m, 9166338 m) dengan elevasi 1 meter. Konsentrasi NO_x di lokasi tersebut mencapai 0,277 µg/m³. Pola penyebaran konsentrasi cenderung horizontal, dengan konsentrasi menurun seiring bertambahnya jarak dari sumber emisi. Pergerakan angin dominan dari barat ke timur berkontribusi dalam membentuk pola distribusi ini, yang menunjukkan konsentrasi terfokus di sekitar area tersebut.



Gambar 6. Peta Isopleth NO_x Periode Semester I 2023
Sumber: Data Penelitian Pribadi (2024)



Gambar 7. Peta Isopleth SO₂ Periode Semester I 2023
Sumber: Data Penelitian Pribadi (2024)

Gambar 7 menggambarkan peta isopleth konsentrasi SO₂ di wilayah yang sama pada Semester I tahun 2023. Titik konsentrasi tertinggi SO₂ ditemukan di koordinat (692977 m, 9166338 m), identik dengan lokasi tertinggi konsentrasi NO_x. Konsentrasi SO₂ di lokasi tersebut tercatat sebesar 0,028 µg/m³, dengan pola penyebaran yang serupa, yaitu horizontal dan terfokus di sekitar sumber emisi. Hal ini menunjukkan pengaruh arah angin dari barat ke timur yang juga memengaruhi pola distribusi SO₂ selama periode ini.



Gambar 8. Peta Isopleth SO₂ Periode Semester II 2023
Sumber: Data Penelitian Pribadi (2024)

Gambar 8 menampilkan peta isopleth konsentrasi NO_x selama Semester II tahun 2023. Pada semester ini, arah angin berubah menjadi dari timur ke barat, sehingga pola penyebaran emisi juga bergeser. Titik konsentrasi tertinggi NO_x terletak pada koordinat (693027 m, 9165888 m) dengan elevasi 1 meter dan konsentrasi sebesar 0,28 µg/m³. Pola penyebaran tetap horizontal, dengan konsentrasi menurun secara bertahap ke arah yang berlawanan dari sumber emisi.



Gambar 9. Peta Isopleth SO₂ Periode Semester II 2023
Sumber: Data Penelitian Pribadi (2024)

Gambar 9 menggambarkan peta isopleth konsentrasi SO₂ selama Semester II tahun 2023. Titik konsentrasi tertinggi SO₂ ditemukan di lokasi yang sama dengan konsentrasi NO_x pada semester ini, yaitu di koordinat (693027 m, 9165888 m) dengan elevasi 1 meter. Konsentrasi SO₂ tercatat sebesar 0,028 µg/m³. Pola penyebaran SO₂ tetap dipengaruhi oleh arah angin dominan dari timur ke barat, dengan distribusi horizontal yang menunjukkan konsentrasi berkurang secara bertahap dari pusat emisi.

Dari keempat peta isopleth yang ditampilkan, terlihat bahwa perubahan arah angin antara Semester I dan II tahun 2023 memengaruhi lokasi titik konsentrasi tertinggi baik untuk parameter NO_x maupun SO₂. Meskipun lokasi bergeser mengikuti arah angin, konsentrasi NO_x tetap stabil pada kisaran 0,27–0,28 µg/m³, sedangkan konsentrasi SO₂ berada pada kisaran 0,028 µg/m³. Pola penyebaran konsentrasi cenderung horizontal dan terfokus di sekitar sumber emisi pada elevasi rendah. Selain itu, konsentrasi NO_x dan SO₂

di wilayah ORF PT X tidak melebihi nilai ambang batas yang ditetapkan PP No. 22 Tahun 2021, sehingga kualitas udara di area tersebut masih tergolong aman.

Berdasarkan hasil pemodelan yang ditampilkan melalui gambar isopleth, pola distribusi polutan NO_x dan SO₂ menunjukkan kesesuaian dengan arah angin dominan yang tercermin pada diagram windrose. Hal ini membuktikan bahwa arah angin memiliki peran signifikan dalam memengaruhi pola penyebaran emisi. Sebagaimana dijelaskan oleh Kurniawati, H. (2019), kecepatan dan arah angin merupakan faktor utama dalam pembentukan pola isopleth. Angin dengan kecepatan tinggi memungkinkan polutan tersebar lebih luas, sedangkan *calm wind* cenderung meningkatkan konsentrasi polutan pada lokasi tertentu. Dengan demikian, pola sebaran emisi secara konsisten menyesuaikan dengan arah angin utama yang digambarkan dalam windrose. Kombinasi arah angin dominan dan kecepatan angin yang bervariasi ini menunjukkan peran penting meteorologi dalam menentukan pola penyebaran polutan di sekitar sumber emisi.

Validasi dengan Data Pemantauan Ambien

Pemantauan udara ambien dilakukan menggunakan data dari *Sampling 1* dan *Sampling 2* yang diperoleh dari hasil pemantauan PT X selama tahun 2023 dengan metode berstandar SNI. Data ini dibandingkan dengan hasil simulasi model dispersi AERMOD dari seluruh titik sumber emisi. Validasi data model dilakukan dengan melihat perbedaan hasil simulasi AERMOD terhadap data pengukuran kualitas udara ambien yang diperoleh di lapangan. Pengambilan uji udara ambien dilaksanakan di berbagai lokasi yang tersebar di sekitar area *Onshore Receiving Facilities* (ORF) untuk memastikan akurasi dan kesesuaian antara hasil simulasi dan kondisi nyata di lapangan, dengan mencocokkan hasil model pada titik koordinat yang sesuai dengan lokasi pemantauan udara ambien. Hasil perbandingan antara konsentrasi yang dihasilkan dari model dan data lapangan dirangkum dalam beberapa tabel berikut untuk analisis lebih lanjut.

Tabel 4. Perbandingan antara Hasil Model dengan Pemantaun di Lapangan Konsentrasi NO_x

Periode	Titik Pemantauan	Hasil Konsentrasi Pemantauan (µg/m ³)	Hasil Konsentrasi AERMOD (µg/m ³)	Perbedaan Konsentrasi (µg/m ³)
SMT I 2023	Sampling 1	18.3	0.14	18.16
	Sampling 2	15.2	0.16	15.04
SMT II 2023	Sampling 1	11.6	0.16	11.44
	Sampling 2	9.9	0.15	9.75

Sumber: Data Penelitian Pribadi (2024)

Tabel 5. Perbandingan antara Hasil Model dengan Pemantaun di Lapangan Konsentrasi SO₂

Periode	Titik Pemantauan	Hasil Konsentrasi Pemantauan (µg/m ³)	Hasil Konsentrasi AERMOD (µg/m ³)	Perbedaan Konsentrasi (µg/m ³)
SMT I 2023	Sampling 1	23.7	0.014	23.69
	Sampling 2	19.6	0.015	19.59
SMT II 2023	Sampling 1	21.8	0.016	21.78
	Sampling 2	19.6	0.015	19.59

Sumber: Data Penelitian Pribadi (2024)

Berdasarkan **Tabel 4** dan **Tabel 5** terlihat bahwa konsentrasi aktual dari pemantauan udara ambien menunjukkan nilai yang jauh lebih tinggi daripada hasil model AERMOD. Hal ini terjadi karena dalam perhitungan model AERMOD, konsentrasi polutan hanya dihitung berdasarkan emisi dari sumber *flarestack* saja, tanpa memperhitungkan aktivitas lain yang dapat berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi polutan di udara, seperti asap kendaraan bermotor, emisi dari aktivitas industri di sekitar area pemantauan, serta emisi fugitive dan sumber emisi lainnya yang mungkin ada.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini, menghasilkan peta pemodelan sebaran emisi udara (NO_x dan SO₂) dari *flarestack* di area *Onshore Receiving Facilities* (ORF) PT X menggunakan perangkat lunak AERMOD. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa pola penyebaran emisi NO_x dan SO₂ dipengaruhi secara signifikan oleh arah dan kecepatan angin, yang diidentifikasi melalui analisis windrose menggunakan perangkat lunak WRPLOT View. Pada Semester I tahun 2023, arah angin dominan bergerak dari barat ke timur, sedangkan pada Semester II arah angin berbalik dari timur ke barat. Pergantian arah angin ini memengaruhi lokasi titik konsentrasi tertinggi NO_x dan SO₂, meskipun konsentrasi tetap stabil pada kisaran 0,27–0,28 µg/m³ untuk NO_x dan 0,028 µg/m³ untuk SO₂.

Pola penyebaran konsentrasi cenderung horizontal dan terfokus di sekitar sumber emisi pada elevasi rendah, dengan konsentrasi yang menurun seiring bertambahnya jarak dari sumber. Hasil ini sesuai teori yang menyatakan bahwa kecepatan dan arah angin merupakan faktor dominan dalam pembentukan pola penyebaran emisi.

Validasi data model menunjukkan bahwa konsentrasi hasil pemodelan AERMOD lebih rendah dibandingkan hasil pengukuran udara ambien di lapangan. Perbedaan ini disebabkan oleh model AERMOD yang hanya menghitung emisi dari sumber cerobong, tanpa memperhitungkan kontribusi aktivitas lain seperti emisi kendaraan bermotor, aktivitas industri di sekitar area pemantauan, serta emisi fugitive. Namun demikian, konsentrasi NO_x dan SO_2 yang terukur tidak melewati nilai ambang batas yang ditetapkan PP No. 22 Tahun 2021, yaitu $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk NO_x/NO_2 dan $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk SO_2 berdasarkan pengukuran 1 jam, sehingga kualitas udara di area ORF PT X masih tergolong aman.

Penelitian ini menegaskan bahwa perangkat lunak AERMOD dapat digunakan untuk menganalisis pola penyebaran emisi berdasarkan data meteorologi dan sumber emisi utama. Hasilnya memberikan wawasan yang penting bagi pengelolaan lingkungan dan pengendalian pencemaran udara di sekitar area ORF PT X.

5. Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT X atas izin dan dukungannya dalam menyediakan data yang dibutuhkan untuk penelitian ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada pihak-pihak yang telah memberikan bimbingan, saran, dan masukan berharga selama proses penyelesaian penelitian ini. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan dampak positif bagi pengelolaan lingkungan dan menjadi kontribusi yang positif dalam pengendalian pencemaran udara di masa depan.

6. Daftar Pustaka

- [1] International Energy Agency, *Electricity information*, France, 2010.
- [2] H. Syukur, "Potensi gas alam di Indonesia," *Jurnal Forum Teknologi*, vol. 6, no. 1, pp. 64-73, 2016.
- [3] H. Lin *et al.*, "Analysis of feasible polygeneration system for power and methanol production taking natural gas and biomass as materials," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 2846-2853, 2010.
- [4] S. Mokhtab, *Handbook of natural gas transmission and processing*, Oxford: Elsevier, 2015.
- [5] Ohio Environmental Protection Agency, *Gas flare: Sistem keamanan dan pembebasan*, Division of Air Pollution Control, 2014.
- [6] S. O. Aghalino, "Gas flaring, environmental pollutions and abatement measures," *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 2, no. 4, pp. 207-214, 2012.
- [7] P. L. Spath and M. K. Mann, *Life cycle assessment of a natural gas combined-cycle power generation system*, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2000.
- [8] S. M. H. Erfani, S. Danesh, S. M. Karrabi, M. Gheibi, and S. Nemati, "Statistical analysis of effective variables on the performance of waste storage service using geographical information system and response surface methodology," *J. Environ. Manage.*, vol. 235, pp. 453-462, 2019.
- [9] Kementerian Lingkungan Hidup, *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2012 tentang Pedoman Penghitungan Beban Emisi Kegiatan Industri Minyak dan Gas Bumi*, 2012.
- [10] PT X, *Laporan kajian LCA PT X 2019*, 2019.
- [11] EPA, "Revision to the guideline on air quality models: Adoption of a preferred general-purpose (flat and complex terrain) dispersion model and other revisions," *Federal Register*, vol. 70, no. 215, pp. 68218-68261, 2005.
- [12] A. S. Rood, "Performance Evaluation of AERMOD, CALPUFF, and Legacy Air Dispersion Models Using the Winter Validation Tracer Study Dataset," *Atmos. Environ.*, vol. 89, pp. 707-720, 2014.
- [13] G. P. Steven *et al.*, "AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part II: Model performance against 17 field study databases," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 44, pp. 694-708, 2004.
- [14] C. Langner and O. Klemm, "A comparison of model performance between AERMOD and AUSTAL 2000," *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 61, no. 6, pp. 640-646, 2011.
- [15] R. Ismahani and W. Anurogo, "Pemodelan AERMOD Untuk Proyeksi Pola Penyebaran Emisi Heat Recovery Steam Generator PT X dan PT Y," *Indonesian Journal of Conservation*, vol. 11, no. 2, pp. 51-63, 2022.