

Pengaruh Faktor Meteorologi terhadap Dispersi Emisi NO₂, SO₂ dan PM dari Cerobong Pabrik Kelapa Sawit Berdasarkan Model AERMOD dan Analisis PCA

Nur Irya Islami*, Yulia Fitri, Sri Fitria Retnawaty, Vanni Ayu Pratiwi, dan Yola Saniya Adista

Program studi Fisika, Fakultas MIPA dan Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Riau, Indonesia; e-mail: yuliafitri@umri.ac.id

ABSTRAK

Industri kelapa sawit merupakan salah satu sumber emisi pencemar udara yang berpotensi menurunkan kualitas lingkungan dan memengaruhi kesehatan masyarakat melalui pelepasan *partikulat* (PM), *nitrogen dioksida* (NO₂), dan *sulfur dioksida* (SO₂) dari proses pembakaran. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dispersi PM, NO₂, dan SO₂ yang berasal dari cerobong industri kelapa sawit, mengevaluasi distribusi spasial konsentrasi polutan terhadap baku mutu udara ambien, serta mengidentifikasi faktor meteorologi yang memengaruhi variasi konsentrasi polutan menggunakan *Principal Component Analysis* (PCA). Penelitian dilakukan pada kawasan industri kelapa sawit PT XY yang memiliki 122 sumber emisi. Pemodelan dispersi dilakukan menggunakan AERMOD dengan data meteorologi periode 2015–2024 yang diolah melalui AERMET dan data topografi *Digital Elevation Model* (DEM) yang diproses menggunakan AERMAP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arah angin dominan berasal dari Timur–Tenggara sehingga pola sebaran polutan cenderung bergerak ke Barat–Barat Laut. Konsentrasi maksimum PM mencapai 378 µg/m³ dan melebihi baku mutu udara ambien di area dekat sumber emisi, sedangkan konsentrasi maksimum NO₂ dan SO₂ masing-masing sebesar 20,5 µg/m³ dan 17,9 µg/m³ masih berada di bawah baku mutu nasional. Sumber emisi terbesar berasal dari tungku bakar dengan laju emisi PM sebesar 361,46 g/s, NO₂ sebesar 22,527 g/s, dan SO₂ sebesar 20,5 g/s. Analisis PCA menghasilkan tiga komponen utama yang mampu menjelaskan 82,7% total variasi data. Curah hujan, radiasi matahari, tekanan udara, suhu, kelembapan, arah angin, dan tutupan awan merupakan faktor meteorologi dominan yang memengaruhi variasi konsentrasi polutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa selain besarnya emisi dari sumber, kondisi meteorologi berperan penting dalam menentukan pola dispersi dan distribusi konsentrasi polutan di kawasan industri kelapa sawit.

Kata kunci: kelapa sawit, AERMOD, PCA, dispersi polutan, faktor meteorologi, emisi cerobong

ABSTRACT

The palm oil industry is one of the sources of air pollutant emissions that has the potential to degrade environmental quality and affect public health thru the release of particulates (PM), nitrogen dioxide (NO₂), and sulfur dioxide (SO₂) from combustion processes. This study aims to model the dispersion of PM, NO₂, and SO₂ originating from palm oil industry chimneys, evaluate the spatial distribution of pollutant concentrations against ambient air quality standards, and identify meteorological factors affecting pollutant concentration variations using Principal Component Analysis (PCA). The research was conducted in the PT XY palm oil industrial area, which has 122 emission sources. Dispersion modeling was conducted using AERMOD with meteorological data from the 2015–2024 period processed thru AERMET and Digital Elevation Model (DEM) topographic data processed using AERMAP. The research results show that the dominant wind direction comes from the Southeast, causing the pollutant dispersion pattern to tend to move toward the West-Northwest. The maximum PM concentration reaches 378 µg/m³, exceeding the ambient air quality standard in the area near the emission source, while the maximum NO₂ and SO₂ concentrations are 20.5 µg/m³ and 17.9 µg/m³, respectively, still below the national air quality standard. The largest source of emissions comes from the combustion furnace with PM emission rates of 361.46 g/s, NO₂ of 22.527 g/s, and SO₂ of 20.5 g/s. PCA analysis produced three principal components that can explain 82.7% of the total data variation. Rainfall, solar radiation, air pressure, temperature, humidity, wind direction, and cloud cover are the dominant meteorological factors that influence the variation in pollutant concentration. The research results show that beside the magnitude of emissions from sources, meteorological conditions play an important role in determining the dispersion patterns and distribution of pollutant concentrations in palm oil industrial areas.

Keywords: palm oil, AERMOD, PCA, pollutant dispersion, meteorological factors, stack emissions

Citation: Islami, N. I., Fitri, Y., Retnawaty, S. F., Pratiwi, V. A., dan Adista, Y. S. (2026). Pengaruh Faktor Meteorologi terhadap Dispersi Emisi NO₂, SO₂ dan PM dari Cerobong Pabrik Kelapa Sawit Berdasarkan Model AERMOD dan Analisis PCA. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(2), 410-421, doi:10.14710/jil.24.2.410-421

1. PENDAHULUAN

Industri kelapa sawit telah lama dikenal sebagai salah satu sektor yang memberi kontribusi besar terhadap pencemaran udara, khususnya di kawasan Asia Tenggara termasuk Indonesia (Yoeliarniza *et al.* 2025). Proses pengolahan kelapa sawit melalui pembangkit biomassa, boiler, dan cerobong pembuangan menghasilkan emisi berbagai polutan utama, termasuk NO_x, SO₂, *Partikulat Matter* (PM), serta CO₂ yang berperan sebagai gas rumah kaca. Dampak dari emisi ini tidak hanya berhubungan dengan perubahan iklim global, tetapi juga terbukti memengaruhi kesehatan masyarakat, terutama penyakit pernapasan (Gonzalez *et al.*, 2023; Keswani *et al.*, 2022; Krastev *et al.*, 2023; Manisolidis *et al.*, 2020; Vandyck *et al.*, 2022). Beberapa studi bahkan menunjukkan adanya hubungan yang konsisten antara tingginya konsentrasi polutan udara dengan meningkatnya kasus gangguan pernapasan di daerah yang padat industri (Cheng *et al.*, 2024; Makgalemane *et al.*, 2024). Fenomena ini semakin terlihat di wilayah industri yang memiliki emisi tinggi, terutama di lokasi di mana banyak pabrik kelapa sawit.

Provinsi Riau merupakan salah satu pusat utama industri kelapa sawit di Indonesia, dengan ribuan hektar perkebunan dan puluhan pabrik kelapa sawit (PKS) yang beroperasi (BPS Riau, 2024). Provinsi ini dikenal sebagai lokasi utama berkembangnya kompleks industri kelapa sawit di Indonesia. Kompleks industri sawit di wilayah ini terdiri dari puluhan pabrik kelapa sawit (PKS) dengan berbagai fasilitas pengolahan. Pada umumnya, pabrik tersebut dilengkapi cerobong emisi dari boiler biomassa, turbin uap, maupun proses pengolahan, yang secara kolektif menjadi jalur pelepasan polutan ke udara. Pada tahun 2022–2023, Riau menempati posisi kedua di Indonesia sebagai produsen CPO, dan pada tahun 2024, peringkatnya meningkat menjadi yang terbesar di Indonesia (Dirjen Perkebunan, 2024). Diperkirakan bahwa emisi dari sektor ini menyumbang sebagian besar polutan udara, terutama NO₂, SO₂, CO₂ dan partikulat (PM), yang berkontribusi signifikan terhadap kejadian pencemaran udara (Lestari *et al.*, 2020; WHO, 2021).

Sebagai provinsi yang memiliki luas perkebunan kelapa sawit terbesar di Indonesia, Riau menjadi pusat berbagai aktivitas pengolahan kelapa sawit yang didukung oleh ratusan fasilitas industri. Kegiatan operasional pada fasilitas tersebut menghasilkan emisi yang berasal dari boiler, tungku pembakaran, dan genset, sehingga berpotensi meningkatkan tingkat pencemaran udara di kawasan industri maupun permukiman di sekitarnya. Meskipun demikian, informasi mengenai pola dispersi polutan serta pengaruh faktor meteorologi terhadap distribusi emisi pada industri kelapa sawit di Provinsi Riau masih terbatas, sehingga kajian yang membahas keterkaitan keduanya masih diperlukan.

Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA) asih menjadi salah satu permasalahan kesehatan

masyarakat di Provinsi Riau. Salah satu faktor yang dapat memengaruhi kualitas udara adalah aktivitas industri pengolahan kelapa sawit yang menggunakan proses pembakaran biomassa pada boiler dan tungku. Proses tersebut menghasilkan berbagai polutan udara, seperti partikulat (PM), nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO₂), dan karbon dioksida (CO₂), yang berpotensi menurunkan kualitas udara di lingkungan sekitar.

Selain besarnya emisi yang dihasilkan, kondisi meteorologi juga memengaruhi proses penyebaran polutan di atmosfer. Parameter seperti arah dan kecepatan angin, suhu, kelembapan, serta curah hujan berperan dalam menentukan arah sebaran dan konsentrasi polutan di udara. Oleh karena itu, kajian dispersi polutan perlu mempertimbangkan data emisi dan kondisi meteorologi agar hasil analisis lebih akurat. Hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung pengelolaan kualitas udara serta penyusunan strategi pengendalian emisi untuk melindungi kesehatan masyarakat.

Salah satu cara yang banyak digunakan untuk menilai dampak pencemaran udara adalah melalui pemodelan kualitas udara. Pendekatan ini memadukan berbagai informasi penting, mulai dari karakteristik sumber emisi, konsentrasi polutan di titik pemantauan, data meteorologi, hingga kondisi spasial seperti topografi dan penggunaan lahan. Dengan metode ini, hubungan dinamis antara sumber emisi dan sebaran konsentrasi polutan dapat dipahami secara lebih menyeluruh, bahkan di wilayah yang belum memiliki jaringan pemantauan kualitas udara. Selain itu, model seperti AERMOD telah terbukti memberikan hasil prediktif yang baik, dan secara resmi direkomendasikan oleh lembaga internasional seperti US EPA (U. S. EPA 2024).

AERMOD merupakan salah satu model dispersi udara yang paling banyak digunakan dan diakui secara resmi oleh American Meteorological Society dan United States Environmental Protection Agency (US-EPA) (U. S. EPA 2024). AERMOD adalah model Gaussian dalam keadaan tunak (*steady-state*) yang digunakan untuk memproyeksikan distribusi polutan dalam jangkauan kurang dari 50 km (Yordan *et al.*, 2025). AERMOD mampu menangani berbagai tipe sumber, seperti titik, garis, area, maupun volume. AERMOD terdiri dari dua komponen utama, yaitu AERMET dan AERMAP. AERMET berfungsi sebagai praprosesor data meteorologi yang menghitung parameter atmosfer dari data cuaca permukaan dan profil vertikal, sementara AERMAP memproses data topografi untuk menentukan elevasi dan kontur lokasi kegiatan (Maisarah and Dian, 2024). Keunggulan AERMOD terletak pada kemampuannya dalam memperhitungkan variasi vertikal kecepatan angin, suhu udara, dan turbulensi, yang semuanya dirata-ratakan dalam lapisan batas planet (*planetary boundary layer*) (Bayraktar and Mutlu, 2024; Yordan *et al.*, 2025). Meskipun begitu, model ini memiliki keterbatasan dalam jangkauan spasial (tidak

disarankan untuk wilayah lebih dari 50 km × 50 km) dan tidak mempertimbangkan reaktivitas kimia dari gas-gas pencemar.

Beberapa studi sebelumnya menunjukkan bahwa pemodelan dengan rata-rata bulanan memberikan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan rata-rata harian atau per jam (Bayraktar and Mutlu, 2024; U.S. EPA 2024). Selain itu Hasil studi-studi tersebut menunjukkan bahwa parameter seperti tinggi cerobong asap dapat memberikan dampak signifikan terhadap penyebaran polutan (Maisarah and Dian, 2024; Rinaldi *et al.*, 2025). Kondisi meteorologi, seperti arah dan kecepatan angin, suhu, kelembapan, dan tinggi lapisan pencampuran (boundary layer), juga terbukti memengaruhi pola dispersi, transformasi, dan konsentrasi emisi. Misalnya, Liu *et al.* (2024) menemukan bahwa meteorologi menyumbang sekitar 46 % terhadap variabilitas konsentrasi PM dan sekitar 65 % terhadap variabilitas potensi oksidatif partikel tersebut; Shi *et al.* (2024) juga menunjukkan bahwa pengaruh meteorologi terhadap prediksi kualitas udara bervariasi secara spasial; selain itu, studi atmosfer di kota-kota seperti di Bulgaria mengonfirmasi bahwa arah angin dan stabilitas atmosfer memainkan peran besar dalam distribusi polutan di sekitar bangunan (Liu *et al.* 2024, Shi *et al.* 2024, Xu *et al.* 2024).

Namun, sebagian besar studi masih terbatas pada pemodelan berbasis asumsi rata-rata emisi tanpa menyinggung interaksi dinamis antara kondisi meteorologi dengan konsentrasi polutan. Untuk itu, analisis statistik multivariat seperti *Principal Component Analysis* (PCA) dapat dimanfaatkan. PCA berfungsi merangkum pola dominan dari gabungan data emisi dan meteorologi, sehingga dapat mengungkap faktor mana yang paling berpengaruh terhadap kualitas udara. Kombinasi antara AERMOD dan PCA diyakini dapat memberikan hasil yang lebih komprehensif, karena tidak hanya memodelkan penyebaran polutan, tetapi juga menganalisis hubungan antarvariabel yang mendasarinya (Zuska *et al.* 2019).

Berbagai penelitian telah memanfaatkan model AERMOD untuk mensimulasikan dispersi polutan udara yang berasal dari aktivitas industri. Namun, penelitian yang mengombinasikan hasil pemodelan dispersi dengan analisis statistik multivariat untuk mengidentifikasi faktor-faktor meteorologi yang paling berpengaruh pada industri kelapa sawit masih terbatas. Kondisi tersebut terutama terlihat di Provinsi Riau, yang merupakan salah satu pusat industri kelapa sawit terbesar di Indonesia. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih menitikberatkan pada estimasi konsentrasi polutan atau evaluasi kualitas udara, sedangkan kajian mengenai hubungan antara variabilitas meteorologi dan pola penyebaran emisi belum banyak dilakukan secara mendalam.

Berdasarkan kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dispersi PM, NO₂, dan SO₂ yang berasal dari cerobong industri kelapa sawit menggunakan model AERMOD. Selain

itu, penelitian ini juga bertujuan mengevaluasi distribusi spasial konsentrasi polutan serta membandingkannya dengan baku mutu udara ambien nasional. Selanjutnya, analisis *Principal Component Analysis* (PCA) digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor meteorologi yang paling dominan dalam memengaruhi variasi konsentrasi PM, NO₂, dan SO₂. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam mendukung pengelolaan kualitas udara serta penyusunan strategi pengendalian emisi yang lebih efektif di kawasan industri kelapa sawit.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Studi Area

Penelitian ini dilakukan di PT XY, sebuah kawasan industri kelapa sawit yang terdiri dari enam pabrik dengan total 122 cerobong emisi. Cerobong-cerobong tersebut berasal dari 6 unit boiler, 7 tungku bakar, 11 genset pabrik, serta 98 genset kebun yang beroperasi pada enam pabrik kelapa sawit (PMKS) yang masing-masing memiliki karakteristik berbeda, seperti tinggi, diameter, kecepatan keluaran gas (exit velocity), serta laju emisi. PT.XY memiliki Lahan dengan luas 873,3023 hektare ini memiliki kapasitas produksi hingga 120 ton/jam, yang memanfaatkan solar juga serabut sebagai salah satu bahan bakar utamanya.

Domain pemodelan AERMOD ditentukan pada area seluas 35 km × 35 km yang mencakup kawasan industri beserta wilayah di sekitarnya yang berpotensi menerima dampak penyebaran polutan. Sistem *receptor* disusun dalam bentuk grid reguler dengan jarak antar-*receptor* yang disesuaikan dengan kebutuhan resolusi spasial agar distribusi konsentrasi polutan dapat direpresentasikan secara optimal. Selain *receptor* berbasis grid, sebanyak 12 *receptor* diskrit ditempatkan pada titik pemantauan kualitas udara yang mewakili area perkantoran dan kawasan perumahan karyawan. Seluruh koordinat sumber emisi maupun *receptor* menggunakan sistem koordinat *Universal Transverse Mercator* (UTM) sebagai acuan dalam proses pemodelan.

Variasi karakteristik ini berpengaruh langsung terhadap pola penyebaran polutan di atmosfer. Jenis emisi yang menjadi fokus penelitian adalah PM, NO₂, dan SO₂, karena merupakan polutan dominan yang dilepaskan dari aktivitas pengolahan kelapa sawit dan memiliki dampak signifikan terhadap kualitas udara serta kesehatan masyarakat.



Gambar 1. Studi Area

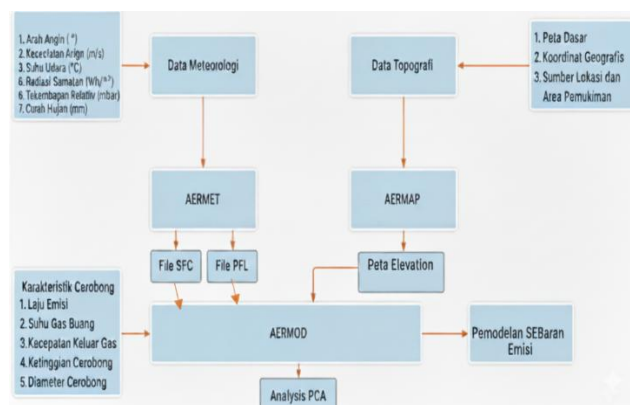
2.2. Data dan Sumber Data

Data berupa Informasi meteorologi, dalam kegiatan ini diperoleh dari data sekunder yang bersumber dari *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) dan *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Parameter yang digunakan meliputi arah angin (°), kecepatan angin (m/s), suhu udara (°C), radiasi matahari (Wh/m²), kelembapan relatif (%), tekanan udara (mbar), dan curah hujan (mm). Data arah angin yang digunakan mencakup rata-rata bulanan selama sepuluh tahun (2015–2024). Koordinat geografis sumber emisi, *receptor*, area pemukiman, dan batas wilayah studi ditentukan menggunakan Google Earth. AERMAP berfungsi menghitung ketinggian dan karakteristik topografi pada setiap titik, sehingga menghasilkan input topografi yang diperlukan oleh AERMOD. Titik-titik ini diatur dalam pola grid dan diasumsikan berada di permukaan tanah (datar), kecuali jika terdapat kontur ekstrem yang memerlukan penyesuaian.

Berdasarkan pengukuran yang dilakukan oleh PT XY, pengambilan sampel dilakukan di 12 titik pemantauan yang mewakili enam pabrik, dengan masing-masing pabrik dipantau di area depan kantor dan kawasan perumahan karyawan. Penentuan lokasi pemantauan ditetapkan berdasarkan arah angin dominan yang diperoleh dari analisis windrose. Selain itu, PT XY juga mengawasi dan mengatur 122 sumber emisi yang meliputi enam unit boiler, tujuh tungku bakar, sebelas genset unit, serta 98 genset kebun.

2.3. Tahapan Riset

Tahapan riset penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Tahapan Riset

2.3.1. Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan kemudian diproses lebih lanjut menggunakan AERMET untuk memproses data meteorologi. Hasil pemrosesan AERMET menghasilkan dua file utama, yaitu file .SFC yang berisi data kondisi permukaan dan file .PFL yang berisi profil atmosfer atas, keduanya kompatibel untuk digunakan dalam AERMOD.

Grafik windrose dibuat menggunakan perangkat lunak WRPLOT View dengan input data arah dan kecepatan angin yang diolah dari ECMWF/NASA. Grafik ini menampilkan arah angin dominan di wilayah studi dan digunakan sebagai dasar dalam menentukan lokasi titik pemantauan kualitas udara (baik di area depan kantor maupun kawasan perumahan karyawan), serta arah sebaran emisi pada model AERMOD. Selain itu, informasi dari windrose menjadi acuan penting untuk menilai efektivitas ventilasi udara alami dan pola persebaran polutan di area tersebut.

Data topografi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari *Digital Elevation Model* (DEM) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) dan dimanfaatkan sebagai masukan (*terrain input*) pada AERMAP. Koordinat sumber emisi, titik *receptor*, serta batas wilayah penelitian diperoleh melalui *Google Earth*, kemudian dikonversi ke dalam sistem koordinat *Universal Transverse Mercator* (UTM) Zona 48N sebelum memasuki tahap pengolahan data.

Data DEM berformat .hgt dengan datum WGS 84 selanjutnya diproses menggunakan AERMAP untuk menentukan nilai elevasi dan karakteristik topografi pada setiap lokasi sumber emisi maupun titik *receptor*. Titik-titik *receptor* disusun membentuk pola grid di dalam domain pemodelan agar variasi kondisi topografi pada wilayah penelitian dapat direpresentasikan secara lebih baik. Hasil pengolahan menggunakan AERMAP kemudian dimanfaatkan sebagai data topografi pada proses simulasi dispersi polutan dengan model AERMOD.

Data pabrik menggunakan data Pengukuran kualitas udara dilakukan 12 titik lokasi pemantauan dari 6 pabrik, yaitu masing-masing pabrik di depan kantor dan Kawasan Perumahan Karyawan. Lokasi pemantauan ditentukan berdasarkan hasil analisis arah angin dominan yang diperoleh dari grafik windrose menggunakan WRPLOT View. Selain parameter PM, NO₂, dan SO₂ pengukuran juga mencakup parameter meteorologi yang meliputi temperatur, kelembapan relatif, arah angin dominan, kecepatan angin, dan tekanan udara. Kedua lokasi ini juga berfungsi sebagai *receptor* utama dalam simulasi AERMOD untuk menghitung sebaran konsentrasi dari sumber emisi.

Di wilayah PT XY, terdapat 122 sumber emisi yang dipantau dan diatur, yakni 6 boiler, 7 tungku bakar, 11 unit genset pabrik serta 98 genset kebun. Masing-masing sumber emisi dimasukkan sebagai point source dalam AERMOD dengan parameter meliputi koordinat lokasi (x, y), tinggi cerobong, diameter cerobong, kecepatan dan suhu gas buang, serta laju emisi (dalam g/s atau mg/Nm³ yang dikonversi bila perlu). Laju emisi dari setiap cerobong diinput ke dalam AERMOD menggunakan format standar agar dapat digunakan untuk menghitung konsentrasi polutan di titik *receptor*.

2.3.2. Laju Emisi

Untuk menghitung karakteristik cerobong pada setiap sumber emisi perlu ditentukan secara rinci karena parameter ini berperan penting dalam pemodelan dispersi polutan menggunakan AERMOD. Sumber emisi diinput ke dalam model sebagai point source dengan parameter meliputi koordinat lokasi, tinggi dan diameter cerobong, suhu serta kecepatan gas buang, dan laju emisi. Setiap parameter disusun sesuai standar AERMOD agar dapat merepresentasikan kondisi lapangan dengan baik. Untuk menghitung laju emisi digunakan persamaan berikut:

$$ER = F \times C_{mass} \times Q_{aktual} \dots\dots\dots(1)$$

(EPA, 2023; Hallaji *et al.*, 2023)

Dimana:

- ER = Laju emisi polutan (g/s atau mg/s)
 F = Faktor konversi (misalnya faktor oksigen/F-factor untuk menghubungkan konsentrasi dengan laju emisi; nilainya tergantung jenis bahan bakar)
 C_{mass} = Konsentrasi polutan pada gas buang (mg/Nm³ atau ppm, dikoreksi ke kondisi standar & O₂ referensi)
 Q_{aktual} = Laju alir gas buang aktual (Nm³/s atau dscm/s), hasil pengukuran kecepatan × luas cerobong yang dikoreksi ke kondisi standar

2.3.3. Pemodelan AERMOD

Pemodelan dilakukan menggunakan AERMOD dengan input utama berupa file meteorologi hasil AERMET (.SFC dan .PFL), file topografi dari AERMAP, serta data sumber emisi titik dan volume. AERMOD mensimulasikan penyebaran Emisi dengan menggunakan pendekatan Gaussian yang mempertimbangkan variasi vertikal kecepatan angin dan tingkat turbulensi atmosfer, pengaruh kontur lahan dan topografi, stabilitas atmosfer, serta karakteristik lapisan batas. Titik diposisikan untuk menghitung konsentrasi polutan di lokasi pemantauan.

2.3.4. Analisis *Principal Component Analysis* (PCA)

Analisis *Principal Component Analysis* (PCA) diterapkan dalam penelitian ini untuk mengidentifikasi hubungan antara parameter meteorologi dan konsentrasi polutan udara, serta menentukan faktor-faktor utama yang memengaruhi variasi konsentrasi PM, NO₂, dan SO₂. Metode PCA mampu menyederhanakan sejumlah variabel yang saling berkorelasi menjadi beberapa komponen utama yang bersifat tidak berkorelasi. Dengan demikian, sebagian besar informasi penting dalam data tetap dapat dipertahankan, sehingga proses analisis dan interpretasi hasil menjadi lebih mudah dilakukan (Wasik *et al.*, 2017; Zglobicki *et al.*, 2018; Radzka *et al.*, 2019; Bak *et al.*, 2018)

Analisis PCA dilakukan dengan melibatkan beberapa variabel, yaitu suhu udara, curah hujan, kelembapan relatif, kecepatan angin, arah angin, tutupan awan, radiasi matahari, tekanan udara, serta

konsentrasi PM, NO₂, dan SO₂. Seluruh variabel dianalisis secara bersamaan tanpa mengelompokkan variabel sebagai variabel dependen maupun independen. Proses analisis menggunakan data tahunan selama periode 2015–2024 yang terdiri atas 10 observasi. Data yang dianalisis merupakan nilai maksimum tahunan dari setiap parameter meteorologi serta gabungan konsentrasi ketiga polutan untuk mengidentifikasi pola hubungan antarvariabel dan faktor-faktor utama yang memengaruhi variasi data.

Sebelum analisis PCA dilakukan, seluruh data distandardisasi menggunakan matriks korelasi (*correlation matrix*) pada perangkat lunak SPSS. Tahapan ini bertujuan untuk menghilangkan pengaruh perbedaan skala dan satuan antarvariabel sehingga setiap variabel memiliki bobot yang sebanding dalam proses analisis. Penentuan jumlah komponen utama dilakukan berdasarkan kriteria Kaiser, yaitu dengan mempertahankan komponen yang memiliki nilai *eigenvalue* lebih besar dari satu.

Untuk mempermudah interpretasi hasil, komponen utama kemudian dirotasi menggunakan metode Varimax yang merupakan rotasi ortogonal. Metode ini bertujuan menghasilkan pola hubungan antarvariabel yang lebih jelas sehingga setiap komponen dapat diinterpretasikan dengan lebih mudah. Interpretasi komponen didasarkan pada nilai *loading factor*, dengan variabel yang memiliki nilai *loading factor* ≥ |0,50| dianggap memberikan kontribusi yang signifikan terhadap komponen utama. Variabel yang memiliki nilai *loading factor* tinggi pada komponen yang sama diinterpretasikan sebagai kelompok variabel yang menunjukkan pola variasi serupa dan merepresentasikan faktor utama yang mendasari sistem.

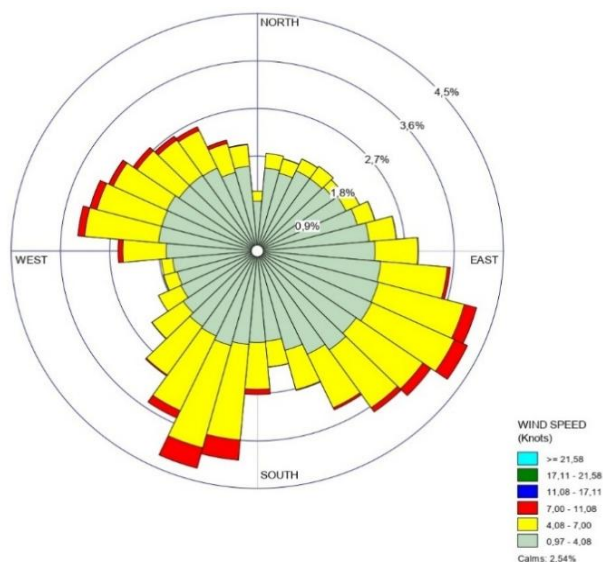
Selanjutnya, hubungan antarvariabel serta kontribusinya terhadap masing-masing komponen dianalisis melalui *component plot*. Pada grafik tersebut, panjang dan arah vektor menunjukkan besarnya kontribusi setiap variabel terhadap komponen utama, sedangkan sudut yang terbentuk antarvektor menggambarkan tingkat korelasi antarvariabel. Komponen utama yang diperoleh kemudian digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor meteorologi yang paling dominan dalam memengaruhi variasi konsentrasi polutan di wilayah penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. *Windrose*

Parameter meteorologi merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi sebaran dan konsentrasi polutan di atmosfer. Parameter yang diamati meliputi suhu udara, kelembapan relatif, curah hujan, serta kecepatan dan arah angin. Dari keseluruhan parameter tersebut, kecepatan dan arah angin serta curah hujan diketahui memiliki pengaruh paling besar terhadap proses pengenceran dan transportasi polutan.

Gambar 3 menunjukkan *Windrose* data meteorologi selama 10 tahun (2015-2024). Arah angin tertinggi berasal dari sektor Timur hingga Tenggara (E-SE), dengan frekuensi sekitar 4,3%. Namun demikian, nilai tersebut relatif rendah dan tidak berbeda jauh dengan sektor arah lainnya, sehingga pola angin di wilayah studi cenderung tersebar ke berbagai arah tanpa adanya arah dominan yang sangat menonjol secara klimatologis. Kecepatan angin didominasi pada rentang 7,00–11,08 knots (warna kuning), sedangkan angin dengan kecepatan >21,58 knots sangat jarang. Kondisi angin tenang (*calm*) tercatat sebesar 2,54%. Berdasarkan pola ini, penyebaran polutan cenderung bergerak menuju Barat hingga Barat Laut (W-NW), mengikuti arah hembusan angin dari sektor Timur-Tenggara. Arah dominan tersebut menyebabkan plume polutan terdorong ke arah *downwind* (bagian hilir angin) sehingga wilayah di sebelah barat sumber emisi menjadi area dengan potensi konsentrasi polutan lebih tinggi.



Gambar 3. *Windrose* 10 Tahun PT. XY

3.2. Pemodelan Sebaran Emisi

Untuk menghitung laju emisi menggunakan persamaan (1). Informasi kuantitatif mengenai laju emisi ini berperan penting dalam pemodelan dispersi polutan menggunakan AERMOD, karena akan menentukan distribusi konsentrasi emisi di udara ambien serta potensi dampak terhadap kualitas lingkungan sekitar. Berikut tabel 1 laju emisi di PT. XY

Tabel 1. Laju Emisi

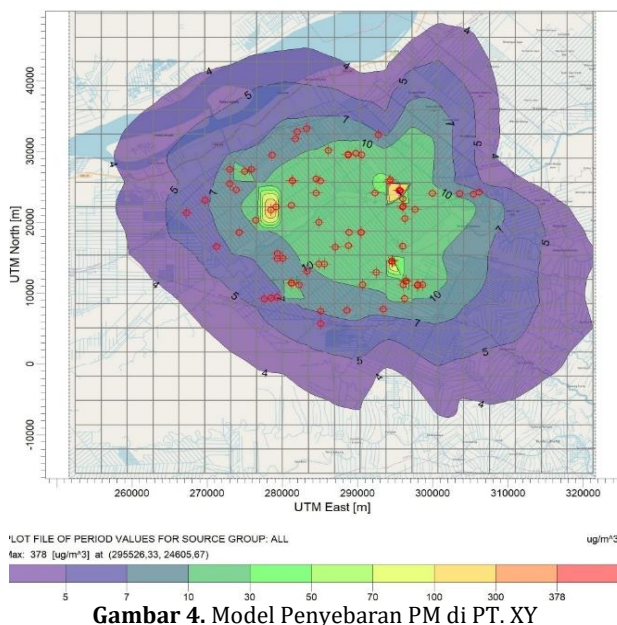
Sumber	PM(g/s)	NO ₂ (g/s)	SO ₂ (g/s)
Boiler	85,547	3	3,627
Tungku	361,46	22,527	20,5
Genset	0,0002	0,00026	0,0002
Genset kebun	0,0003	0,0004	0,0003

3.2.1. Emisi PM

Sumber dominan emisi PM berasal dari kelompok tungku bakar dan boiler, sedangkan kontribusi genset

relatif rendah akibat kapasitas dan waktu operasional yang terbatas. Secara kumulatif, kedua kelompok pembakaran padat tersebut menyumbang lebih dari 75% dari total beban emisi partikulat di fasilitas, sehingga strategi pengendalian emisi difokuskan pada optimalisasi kinerja tungku dan boiler serta penerapan teknologi pengendali emisi yang sesuai.

Hasil pemodelan AERMOD untuk partikulat (PM) menunjukkan konsentrasi maksimum sebesar 378 µg/m³ yang terletak di sekitar koordinat sumber emisi utama. Pola sebaran konsentrasi terlihat menurun seiring bertambahnya jarak dari pusat emisi. Pada radius dekat (0–5 km dari sumber PT. XY), konsentrasi polutan relatif tinggi dengan kisaran >150 µg/m³, bahkan melampaui baku mutu udara ambien nasional sebesar 150 µg/m³ (PP No. 22 Tahun 2021). Konsentrasi mulai menurun secara bertahap pada jarak 10–20 km, dengan kisaran 30–70 µg/m³, yang sudah berada di bawah baku mutu. Pada area yang lebih jauh, sekitar 25–35 km, konsentrasi semakin melemah dan hanya mencapai <10 µg/m³, sehingga tidak berpotensi menimbulkan gangguan kualitas udara.



Gambar 4. Model Penyebaran PM di PT. XY

Jika dikaitkan dengan sumber emisi, data laju emisi menunjukkan bahwa tungku merupakan kontributor terbesar terhadap emisi PM dengan nilai 361,46 g/s, jauh lebih tinggi dibandingkan boiler sebesar 85,547 g/s. Sebaliknya, genset pabrik maupun genset kebun hanya menyumbang emisi sangat kecil (<0,001 g/s), sehingga kontribusinya terhadap konsentrasi PM ambien dapat diabaikan. Dominasi emisi dari tungku terlihat pada hasil pemodelan, di mana konsentrasi tinggi terlokalisasi di sekitar kluster pabrik dengan aktivitas pembakaran padat. Sementara itu, emisi dari boiler meskipun lebih kecil dibanding tungku, tetap memberi kontribusi signifikan mengingat jumlah unit yang beroperasi dan ketinggian cerobong yang relatif lebih besar, sehingga

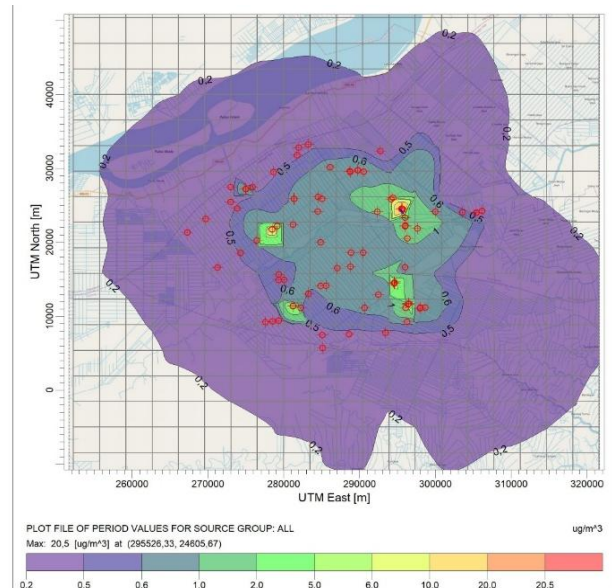
memengaruhi pola dispersi di lapisan atmosfer lebih tinggi.

Sebaran polutan yang dominan ke arah barat-barat laut menunjukkan peran penting kondisi meteorologi, khususnya arah angin yang mendorong plume menuju wilayah hilir. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tingginya konsentrasi PM di area sekitar sumber terutama disebabkan oleh tingginya emisi tungku, sementara pengenceran konsentrasi di area yang lebih jauh dipengaruhi oleh faktor jarak dan dinamika angin. Tingginya konsentrasi PM di sekitar titik sumber terutama disebabkan oleh sifat partikulat yang relatif berat sehingga cenderung bertahan dekat dengan lokasi pelepasan sebelum mengalami pengenceran. Partikel yang keluar dari cerobong dalam jumlah besar akan membentuk plume pekat di area terdekat, dan proses deposisi gravitasi menyebabkan sebagian partikulat mengendap lebih cepat sehingga akumulasi konsentrasi lebih terasa di sekitar sumber. Hal ini sejalan dengan karakteristik partikulat yang umumnya terakumulasi tinggi di sekitar titik sumber emisi akibat sifatnya yang lebih cepat mengendap dibanding polutan gas (Hao *et al.* 2024).

Konsentrasi maksimum PM sebesar $378 \mu\text{g}/\text{m}^3$ menunjukkan adanya potensi risiko terhadap kesehatan masyarakat yang berada di sekitar sumber emisi, terutama pada kelompok rentan, seperti anak-anak, lansia, dan individu yang memiliki penyakit pernapasan. Paparan partikulat dalam konsentrasi tinggi berpotensi menimbulkan berbagai dampak terhadap kesehatan, seperti gangguan fungsi paru-paru, iritasi saluran pernapasan, penyakit kardiovaskular, dan gangguan respiratori. Sejumlah penelitian juga menunjukkan bahwa paparan partikulat, termasuk PM, berkaitan dengan meningkatnya risiko penyakit jantung iskemik, stroke, penyakit paru obstruktif kronis (PPOK), asma, serta kematian dini akibat pencemaran udara (Orellano *et al.*, 2020; Chen & Hoek, 2020; WHO, 2021; Orellano *et al.*, 2024). Oleh karena itu, pengendalian emisi partikulat yang berasal dari boiler dan tungku perlu menjadi prioritas dalam upaya pengelolaan kualitas udara di kawasan industri.

3.2.2. Emisi NO_2

Simulasi AERMOD memperlihatkan bahwa konsentrasi rata-rata tahunan NO_2 di sekitar kawasan industri masih relatif rendah jika dibandingkan dengan baku mutu udara ambien ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Titik tertinggi konsentrasi tercatat sebesar $20,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, yang pola distribusinya menunjukkan bahwa sebaran NO_2 membentuk zona konsentrasi tinggi di sekitar cerobong, kemudian menurun seiring bertambahnya jarak. Pada radius 5–10 km, konsentrasi umumnya turun ke kisaran $2\text{--}10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dan di area yang lebih jauh konsentrasi semakin melemah di bawah $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Model Penyebaran NO_2 di PT. XY

Bila ditinjau dari data laju emisi, tungku menyumbang emisi NO_2 paling besar ($22,527 \text{ g/s}$) dibandingkan boiler (3 g/s) maupun genset yang kontribusinya hampir tidak signifikan. Besarnya nilai ini menjelaskan mengapa titik-titik sekitar area tungku menjadi pusat akumulasi konsentrasi NO_2 . Sementara boiler berkontribusi lebih kecil, tetapi tetap terlihat dalam model karena cerobongnya lebih tinggi sehingga plume dapat terdispersi lebih jauh sebelum terendapkan.

Arah sebaran plume yang dominan ke barat-barat laut juga sejalan dengan pola angin yang bertiup dari timur-tenggara, sehingga gas hasil pembakaran terbawa menuju sisi hilir. Karakteristik dispersi NO_2 cenderung membentuk pola yang lebih melebar dibanding PM, karena sifat gas ini lebih mudah mengikuti pergerakan angin.

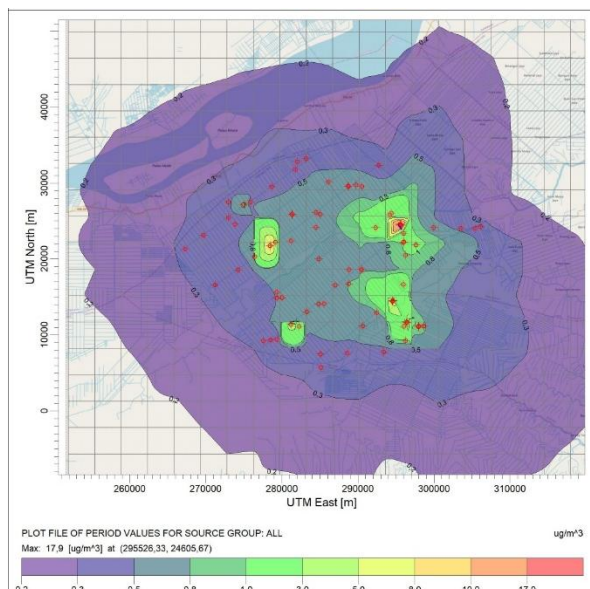
Meskipun konsentrasi NO_2 hasil pemodelan masih berada di bawah baku mutu udara ambien nasional, potensi paparan jangka panjang tetap perlu diperhatikan, terutama apabila terjadi akumulasi polutan di kawasan permukiman yang berada di sekitar industri. WHO (2021) menetapkan pedoman kualitas udara tahunan untuk NO_2 sebesar $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ karena paparan dalam jangka waktu yang lama diketahui dapat meningkatkan risiko gangguan fungsi paru, memicu inflamasi saluran pernapasan, serta memperburuk penyakit respiratori pada kelompok masyarakat yang rentan. Oleh karena itu, pemantauan kualitas udara secara berkala tetap diperlukan untuk memastikan konsentrasi NO_2 tetap berada pada tingkat yang aman dan tidak menimbulkan dampak kesehatan bagi masyarakat di sekitar lokasi industri.

3.2.3. Emisi SO_2

Berdasarkan hasil perhitungan laju emisi, tungku menjadi sumber utama emisi SO_2 dengan laju emisi sebesar $20,5 \text{ g/s}$, sedangkan boiler menghasilkan laju emisi sebesar $3,627 \text{ g/s}$. Besarnya kontribusi emisi SO_2 dari tungku diduga dipengaruhi oleh intensitas proses pembakaran serta karakteristik bahan bakar

yang digunakan. Sementara itu, kontribusi emisi dari genset relatif kecil sehingga tidak memberikan pengaruh yang signifikan dibandingkan dengan kedua sumber emisi tersebut. Oleh karena itu, upaya pengendalian emisi SO₂ perlu diprioritaskan pada tungku melalui penggunaan bahan bakar dengan kandungan sulfur yang lebih rendah serta penerapan teknologi desulfurisasi gas buang.

Data laju emisi tersebut selanjutnya digunakan sebagai masukan dalam pemodelan dispersi menggunakan AERMOD untuk memperkirakan distribusi konsentrasi SO₂ di udara ambien. Hasil pemodelan yang disajikan pada Gambar 6 menunjukkan bahwa konsentrasi maksimum SO₂ mencapai 17,9 µg/m³. Meskipun tungku merupakan penyumbang emisi SO₂ terbesar, hasil simulasi menunjukkan bahwa konsentrasi SO₂ di udara ambien masih berada di bawah baku mutu udara ambien nasional.



Gambar 6. Model Penyebaran SO₂ di PT. XY

Sebaran polutan membentuk pola plume yang memanjang ke arah barat hingga barat laut, sejalan dengan arah angin dominan dari sektor timur-tenggara sebagaimana ditunjukkan pada analisis wind rose (Gambar 3). Konsentrasi tertinggi terlokalisasi di sekitar sumber emisi yang ditandai dengan zona berwarna hijau hingga kuning, kemudian menurun secara bertahap menuju wilayah hilir yang didominasi warna biru hingga ungu. Pola tersebut mencerminkan karakteristik dispersi Gaussian, yaitu konsentrasi polutan yang semakin menurun seiring bertambahnya jarak dari sumber emisi.

Hasil pemodelan mengindikasikan bahwa kondisi meteorologi setempat, terutama arah dan kecepatan angin, berperan penting dalam mengendalikan arah penyebaran serta akumulasi SO₂ di wilayah hilir.

Walaupun konsentrasi maksimum SO₂ masih berada di bawah baku mutu udara ambien nasional, potensi dampak kesehatan akibat paparan jangka panjang tetap perlu diperhatikan. Paparan SO₂ secara terus-menerus diketahui dapat menyebabkan iritasi saluran pernapasan serta memperburuk kondisi individu yang memiliki penyakit respiratori (WHO, 2021; Orellano *et al.*, 2021). Menurut WHO (2021), paparan SO₂ dalam jangka panjang berkontribusi terhadap meningkatnya risiko gangguan kesehatan pernapasan, terutama pada kelompok masyarakat yang rentan. Oleh karena itu, penerapan strategi pengendalian emisi tetap diperlukan sebagai langkah pencegahan untuk meminimalkan potensi dampak kesehatan serta menjaga kualitas udara di sekitar kawasan industri.

3.3. Analisis PCA

Perhitungan dilakukan terhadap matriks korelasi antarvariabel serta nilai eigen dari matriks tersebut. Hasil koefisien korelasi menunjukkan bahwa variabel bebas, yaitu unsur-unsur meteorologi, saling berkorelasi (Tabel 2). Oleh karena itu, digunakan metode PCA, karena metode ini dapat membentuk komponen utama yang saling bebas secara linear dan merupakan kombinasi linear dari variabel meteorologi tersebut.

Korelasi antara unsur-unsur meteorologi dengan konsentrasi PM, SO₂, dan NO₂ pada 10 tahun (2015-2024) ditunjukkan pada Tabel 2. Menurut skala yang diusulkan oleh Stanisz (stanisz,2006) ($|r| > 0,5$). Pengaruh tertinggi terhadap konsentrasi PM, SO₂, dan NO₂ terlihat pada tekanan udara, curah hujan, dan kecepatan angin rata-rata. Tekanan udara menunjukkan korelasi positif yang kuat ($r = 0,746$) sehingga peningkatan tekanan udara cenderung diikuti oleh peningkatan konsentrasi PM, SO₂, dan NO₂. Curah hujan memiliki pengaruh negatif yang signifikan ($r = -0,636$), menunjukkan bahwa hujan berperan besar dalam menurunkan kadar polutan di udara. Selain itu, kecepatan angin rata-rata juga menunjukkan hubungan positif ($r = 0,664$), mengindikasikan pergerakan angin dapat mengangkat dan menyebarkan partikel polutan ke area pengamatan.

Ada faktor serupa yang memengaruhi emisi PM, SO₂, dan NO₂, karena semuanya berasal dari aktivitas industri dan pembakaran bahan bakar fosil. Selain itu, dapat ditemukan bahwa NO dan NO₂ yang dilepaskan dari aktivitas pertanian melalui oksidasi nitrogen dari tanah berkontribusi pada pembentukan partikel PM_{2.5} sekunder di wilayah pedesaan; ini menunjukkan bahwa SO₂ dan NO_x juga merupakan sumber utama partikel PM_{2.5} di atmosfer. Akibatnya, tidak hanya faktor meteorologi yang memengaruhi, tetapi juga interaksi kimiawi yang terjadi antara gas-gas prekursor ini (Giao 2021, Teani *et al.* 2022).

Tabel 2. Matriks Korelasi Unsur-Unsur Meteorologi (2015-2024)

Parameter	Sampel					Arah Angin	Tutupan awan	Radiasi Matahari	Tekanan Udara (Mbar)
	Konsentrasi PM, SO ₂ , dan NO ₂	Suhu Rata-Rata (C)	Curah Hujan (mm)	Kelembapan (%)	Kecepatan Angin				
Konsentrasi Emisi (ug,m3)	1,000								
Suhu Rata-Rata (C)	0,129	1,000							
Curah Hujan (mm)	-0,636	0,177	1,000						
Kelembapan (%)	0,073	0,744	0,398	1,000					
Kecepatan Angin	0,664	0,002	-0,460	0,134	1,000				
Arah Angin (°)	0,193	-0,214	-0,307	0,103	-0,128	1,000			
Tutupan Awan	-0,186	-0,104	-0,045	0,237	0,115	0,456	1,000		
Radiasi Matahari	-0,277	0,827	0,642	0,840	-0,238	-0,248	-0,018	1,000	
Tekanan Udara (Mbar)	0,746	0,116	-0,705	-0,180	0,471	0,078	-0,496	-0,348	1,000

Sumber data diolah dari hasil SPSS

Tabel 3. Nilai Eigen dari Matriks Korelasi (2015-2024)

Emisi PM	Component 1	Component 2	Component 3
Nilai Eigen	3,5	2,4	1,6
%varians	38,2	26,2	18,3
%kumulatif	38,2	64,4	82,7

Tabel 4. Komponen Utama Unsur-Unsur Meteorologi (2015-2024)

Unsur meteorologi	Component 1	Component 2	Component 3
Konsentrasi Emisi (ug,m3)	-0,682	0,624	0,113
Suhu Rata-Rata (C)	0,475	0,8	-0,029
Curah Hujan (mm)	0,874	-0,153	-0,189
Kelembapan (%)	0,591	0,673	0,393
Kecepatan Angin	-0,525	0,508	0,173
Arah Angin (°)	-0,236	-0,137	0,762
Tutupan Awan	0,149	-0,222	0,881
Radiasi Matahari	0,853	0,509	-0,14
Tekanan Udara (Mbar)	-0,743	0,519	-0,233

Hasil analisis *Principal Component Analysis* (PCA) yang disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3 menunjukkan bahwa terdapat tiga komponen utama yang secara kumulatif mampu menjelaskan 82,7% variasi emisi PM, SO₂, dan NO₂ selama periode 2015–2024. Komponen utama pertama memiliki nilai eigen sebesar 3,5 dengan kontribusi terhadap total varians mencapai 38,2%. Komponen ini ditandai oleh nilai loading yang tinggi pada variabel curah hujan (0,874) dan radiasi matahari (0,853), serta nilai loading negatif pada tekanan udara (-0,743). Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa komponen pertama merepresentasikan dinamika cuaca dan kondisi atmosfer yang berperan penting dalam memengaruhi proses dispersi serta pengenceran polutan di udara.

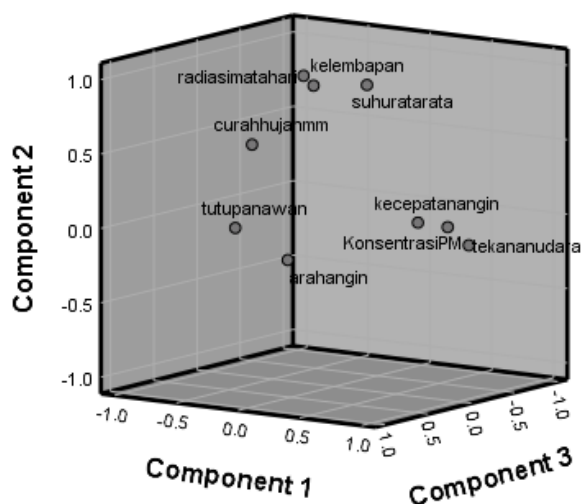
Komponen utama kedua memiliki nilai eigen sebesar 2,4 dengan kontribusi terhadap total varians sebesar 26,2%. Komponen ini didominasi oleh variabel suhu rata-rata (0,800) dan kelembapan (0,673), yang menunjukkan bahwa kedua faktor tersebut berperan penting dalam membentuk kondisi termal dan kelembapan atmosfer. Kondisi tersebut selanjutnya memengaruhi variasi konsentrasi polutan yang terdispersi di udara.

Komponen utama ketiga memiliki nilai eigen sebesar 1,6 dengan kontribusi terhadap total varians sebesar 18,3%. Komponen ini terutama dipengaruhi oleh variabel arah angin (0,762) dan tutupan awan (0,881), yang menunjukkan bahwa kondisi sirkulasi atmosfer lokal berperan dalam menentukan arah

pergerakan dan distribusi polutan di udara. Variasi kedua parameter tersebut memengaruhi pergeseran arah plume polutan menuju wilayah tertentu. Temuan ini sejalan dengan hasil pemodelan menggunakan AERMOD yang menunjukkan bahwa penyebaran polutan cenderung mengarah ke sektor barat hingga barat laut.

Secara umum, hasil pada Tabel 2 dan Tabel 3 menunjukkan bahwa ketiga komponen utama menggambarkan variasi emisi yang tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya emisi yang dihasilkan dari sumber, seperti boiler, tungku, dan genset, tetapi juga oleh kondisi meteorologi di lokasi penelitian. Temuan ini menunjukkan bahwa faktor meteorologi memiliki peran yang signifikan dalam memengaruhi karakteristik dispersi polutan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap keterkaitan antara sumber emisi dan kondisi atmosfer menjadi aspek penting dalam menginterpretasikan hasil pemodelan dispersi serta menyusun strategi pengendalian pencemaran udara yang lebih efektif di kawasan industri.

Gambar 7 menyajikan visualisasi hubungan antarvariabel berdasarkan hasil analisis PCA. Pada gambar tersebut, label "Konsentrasi PM" digunakan sebagai contoh untuk merepresentasikan variabel konsentrasi polutan. Meskipun demikian, pola hubungan yang ditunjukkan juga menjadi dasar dalam menginterpretasikan variasi konsentrasi NO₂ dan SO₂, karena ketiga jenis polutan dianalisis menggunakan metode PCA dengan prosedur yang sama.



Gambar 7. Komponen Plot

Gambar 7 menunjukkan hubungan antar variabel berdasarkan plot komponen hasil PCA. Radiasi matahari, curah hujan, kelembapan relatif, dan suhu rata-rata berada di rentang yang hampir sama, yang menunjukkan korelasi positif dan pola perubahan yang hampir identik. Sebaliknya, arah angin memberikan kontribusi yang berbeda untuk membentuk komponen utama karena berada di tempat yang berbeda. Dengan kecepatan angin dan tekanan udara yang relatif dekat, konsentrasi polutan berubah, menunjukkan bahwa cuaca mengatur penyebaran dan perpindahan polutan di udara. Pemisahan posisi vektor menunjukkan kontribusi masing-masing terhadap komponen utama, sedangkan kedekatan arah vektor menunjukkan hubungan yang baik antarvariabel. Hasil ini menunjukkan bahwa tidak hanya jumlah emisi dari berbagai sumber yang memengaruhi penyebaran polutan di area penelitian, tetapi juga berbagai faktor cuaca yang memengaruhi bagaimana polutan berkumpul dan menyebar.

3.4. Keterbatasan Penelitian

Salah satu kendala penelitian ini adalah menggunakan data meteorologi yang diperoleh dari sumber sekunder. Hal ini dapat menyebabkan data yang digunakan belum sepenuhnya mencerminkan karakteristik iklim mikro di lokasi penelitian, yang dapat berdampak pada tingkat ketelitian hasil analisis. Selain itu, perhitungan laju emisi didasarkan pada data pengukuran dan asumsi kondisi operasi tertentu, sementara aktivitas industri dapat berubah dalam kondisi aktual, yang berdampak pada besarnya emisi yang dilepaskan ke atmosfer. Model AERMOD digunakan untuk mensimulasikan penyebaran polutan di atmosfer, akan tetapi model tersebut memiliki keterbatasan karena belum dapat menggambarkan proses transformasi kimia yang berlangsung secara kompleks, terutama pembentukan senyawa sekunder yang berasal dari reaksi NO₂ dan SO₂ di udara. Untuk memperoleh hasil

yang lebih baik, penelitian berikutnya sebaiknya menggunakan data meteorologi lokal dengan tingkat resolusi yang lebih tinggi sehingga kondisi atmosfer di lokasi penelitian dapat direpresentasikan secara lebih akurat. Selain itu, penggunaan model kualitas udara yang mampu mempertimbangkan proses kimia yang terjadi di atmosfer juga dianjurkan agar hasil pemodelan menjadi lebih lengkap dan andal.

4. KESIMPULAN

Pemodelan dilakukan untuk menggambarkan pola dispersi polutan berdasarkan data emisi PM, NO₂, dan SO₂ dan meteorologi yang tersedia yang berasal dari industri kelapa sawit di PT XY menggunakan model AERMOD dengan memanfaatkan data emisi dan parameter meteorologi sebagai masukan simulasi. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa konsentrasi maksimum PM mencapai 378 µg/m³, sehingga melampaui baku mutu udara ambien nasional pada area yang berada di sekitar sumber emisi. Sebaliknya, konsentrasi maksimum NO₂ sebesar 20,5 µg/m³ dan SO₂ sebesar 17,9 µg/m³ masih berada di bawah baku mutu yang berlaku. Hasil analisis juga mengidentifikasi tungku bakar sebagai sumber emisi utama yang memberikan kontribusi terbesar terhadap pelepasan PM, NO₂, dan SO₂ dibandingkan sumber emisi lainnya.

Pola dispersi ketiga polutan menunjukkan kecenderungan penyebaran ke arah barat hingga barat laut yang dipengaruhi oleh kondisi meteorologi setempat, terutama arah dan kecepatan angin. Analisis Principal Component Analysis (PCA) menghasilkan tiga komponen utama yang mampu menjelaskan 82,7% variasi data. Hasil tersebut menunjukkan bahwa curah hujan, radiasi matahari, tekanan udara, suhu udara, kelembapan relatif, arah angin, dan tutupan awan merupakan faktor meteorologi yang berperan penting dalam memengaruhi variasi konsentrasi serta pola penyebaran polutan. Temuan ini mengindikasikan bahwa distribusi polutan di kawasan industri tidak hanya ditentukan oleh besarnya emisi yang dilepaskan dari sumber pencemar, tetapi juga oleh karakteristik atmosfer yang mengendalikan proses transportasi dan pengenceran polutan.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, antara lain penggunaan data meteorologi yang bersumber dari data sekunder, asumsi laju emisi yang dianggap konstan selama proses simulasi, serta keterbatasan model AERMOD dalam merepresentasikan proses transformasi kimia di atmosfer secara rinci. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan memanfaatkan data meteorologi lokal dengan resolusi yang lebih tinggi serta melakukan validasi hasil pemodelan menggunakan data observasi lapangan. Langkah tersebut diharapkan dapat meningkatkan akurasi dan keandalan hasil simulasi, sehingga mampu memberikan gambaran yang lebih representatif

mengenai kondisi dispersi polutan di kawasan industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Bak, A. Application of multidimensional analysis methods comparative to environmental assessment in the Lower Silesian Voivodeship. *Wiad. Statyst.* 2018, LXIII, 7–20.
- Bayraktar, O.M. and Mutlu, A., 2024. Analyses of industrial air pollution and long-term health risk using different dispersion models and WRF physics parameters. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 17 (10), 2277–2305.
- Benestad, R.E., Chen, D., Mezghani, A., Fan, L., and Parding, K., 2015. On using principal components to represent stations in empirical-statistical downscaling. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 67(1), 26931.
- BPS Provinsi Riau, 2024. Statistik Kelapa Sawit Provinsi Riau 2022. Pekanbaru: BPS Provinsi Riau.
- Cheng, B., Ma, Y., Qin, P., Wang, W., Zhao, Y., Liu, Z., Zhang, Y., & Wei, L. 2024. Characterization of air pollution and associated health risks in Gansu Province, China from 2015 to 2022. *Scientific Reports*, 14(1).
- Chen, J., and Hoek, G. 2020. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 143, 105974. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105974
- Giao, N.T., 2021. Assessment of Air Quality in Can Tho City, Vietnam Using Cluster Analysis. *Indonesian Journal of Environmental Management and Sustainability*, 5, 154–161.
- Gonzalez, R.A., Schalm, O., Alvarez Cruz, A., Hernandez Rodriguez, E., Morales Perez, M.C., Alejo Sanchez, D., Martinez Laguardia, A., Jacobs, W. and Hernandez Santana, L., 2023. Relevance and reliability of outdoor SO₂ monitoring in low-income countries using low-cost sensors. *Atmosphere*, 14(6), 1017. DOI:<https://doi.org/10.3390/atmos14061017>
- Hallaji, H., Bohloul, M.R., Peyghambarzadeh, S.M. dan Azizi, S. 2023. Measurement of Air Pollutants Concentrations from Stacks of Petrochemical Company and Dispersion Modeling by AERMOD Coupled with WRF Model, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(7), hlm. 7217–7236. DOI: 10.1007/s13762-023-04959-w.
- Hao, H., Wang, K., Wu, G., Liu, J. and Li, J., 2024. PM_{2.5} concentrations based on near-surface visibility in the Northern Hemisphere from 1959 to 2022. *Earth System Science Data*, 16(9), pp.4051–4076. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-16-4051-2024>
- Keswani, A., Akselrod, H. and Anenberg, S., 2022. Health and clinical impacts of air pollution and linkages with climate change. *New England Journal of Medicine*, 387(22), pp.1993–2005.
- Krastev, I., Ivanov, H., Ivanova, D., & Badur, J. 2023. A novel method for calculating greenhouse gas emissions from the combustion of energy fuels. *Archives of Thermodynamics*, 43(4), pp.3–20.
- Lestari, P., Damayanti, S. and Arrohan, M.K., 2020. Emission inventory of pollutants (CO, SO₂, PM_{2.5} and NO_x) in Jakarta, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 489, 012014.
- Liu, J., Christensen, J.H., Ye, Z., Dong, S., Geels, C., Brandt, J., Nenes, A., Yuan, Y., and Im, U., 2024. Impact of meteorology and aerosol sources on PM_{2.5} and oxidative potential variability and levels in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24 (18), 10849–10867.
- Maisarah, M. and Dian, R., 2024. Metode Life Cycle Assessment (LCA) Dalam Penilaian Dampak Lingkungan Industri Kelapa Sawit Untuk Kelapa Sawit Berkelanjutan. *Tabel Jurnal Pertanian Berkelanjutan*, 2 (1), 15–23.
- Makgalemane, M. R., Patrick, S., & Shirinde, J. (2024). Respiratory conditions and health symptoms associated with air pollution amongst children aged six years and below in Melusi Informal Settlement, Tshwane Metropolitan Municipality, South Africa: A cross-sectional study. *BMC Public Health*, 24(1), Article 1169.
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health*, 8, 14. DOI: 10.3389/fpubh.2020.00014
- Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N., Bardach, A., & Ciapponi, A. 2020. Short-term exposure to particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}), nitrogen dioxide (NO₂), and ozone (O₃) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 142, 105876.
- Orellano, P., Reynoso, J., & Quaranta, N. 2021. Short-term exposure to sulphur dioxide (SO₂) and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 150, 106434.
- Orellano, P., Kasdagli, M. I., Perez Velasco, R., & Samoli, E. 2024. Long-term exposure to particulate matter and mortality: An update of the WHO global air quality guidelines systematic review and meta-analysis. *International Journal of Public Health*, 69, 1607683. <https://doi.org/10.3389/ijph.2024.1607683>
- Pemerintah Republik Indonesia, 2021. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Jakarta: Pemerintah Republik Indonesia.
- Radzka, E. and Rymuza, K., 2019. The effect of meteorological conditions on PM₁₀ and PM_{2.5} air pollution. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection)*, 21, pp.36–52.
- Rinaldi, A., Djamli, N., Harahap, N.S., Syamsurizal, S., and Putri, N.S., 2025. Assessment and improvement plan of the sustainability index in the development of palm bioenergy for Riau province electricity in Indonesia as a case study. *Journal of Energy Systems*, 9 (1), 12–22.
- Shi, X., Li, B., Gao, X., Yabo, S.D., Wang, K., Qi, H., Ding, J., Fu, D., and Zhang, W., 2024. An Evaluation of the Influence of Meteorological Factors and a Pollutant Emission Inventory on PM_{2.5} Prediction in the Beijing–Tianjin–Hebei Region Based on a Deep Learning Method. *Environments - MDPI*, 11 (6).
- Stanisz, A., 2006. Accessible Statistics Course Using STATISTICA PL on Examples from Medicine. Vol. 1. Kraków, Poland: StatSoft.
- Teani, I.P., Turyanti, A., Wattimena, R.C., Paramitadevi, Y.V., and Kurniawan, F., 2022. Fluctuations of PM_{2.5} and NO_x Concentration and Their Relationship with Meteorological Factors in the Rural Area (Case Study: Puncak Bogor). *Jurnal Presipitasi*, 19 (3), 451–463.
- United States Environmental Protection Agency (EPA), 2023. Method 19—Determination of Sulfur Dioxide

- Islami, N. I., Fitri, Y., Retnawaty, S. F., Pratiwi, V. A., dan Adista, Y. S. (2026). Pengaruh Faktor Meteorologi terhadap Dispersi Emisi NO₂, SO₂ dan PM dari Cerobong Pabrik Kelapa Sawit Berdasarkan Model AERMOD dan Analisis PCA. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(2), 410-421, doi:10.14710/jil.24.2.410-421
- Removal Efficiency and Particulate Matter, Sulfur Dioxide, and Nitrogen Oxide Emission Rates. Washington, DC: U.S. EPA.
- U. S. EPA, 2024. Final Updates to the Air Quality Index (AQI) for Particulate Matter - Fact Sheet and Common Questions, 1–4.
- Vandyck, T., Ebi, K.L., Green, D., Cai, W. and Vardoulakis, S., 2022. Climate change, air pollution and human health. *Environmental Research Letters*, 17(10), 102001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac8ed7>
- Wasik, E., Chmielowski, K. and Operacz, A., 2017. PCA as a data mining tool characterizing the work of nitrification reactors in the sewage treatment plant in Trepca. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus*, 16(4), pp.209–222.
- World Health Organization. 2021. WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization.
- Xu, H., Zhao, H., Zhu, Z., and Zhang, J., 2024. Impact of Meteorology on PM_{2.5} and O₃ Pollution in Three Provincial Cities in Northeastern Provinces of China. *Aerosol and Air Quality Research*, 24 (12), 1–19.
- Yoeliarniza, A., Khairina, K., Firdus, F., Nasir, M., and Rizki, A., 2025. Literatur Review: Studi Kasus Pencemaran Industri Kelapa Sawit di Indonesia. *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, 11 (1), 139.
- Yordan, M., Futari, R., and Ali, M., 2025. Pemodelan Sebaran Polutan Udara dari Flarestack Menggunakan AERMOD di Onshore Receiving Facilities PT X, X (1), 11854–11864.
- Zglobicki, W., Telecka, M., Skupinski, S., Pasierbinska, A. and Koziel, M., 2018. Assessment of heavy metal contamination levels of street dust in the city of Lublin, E Poland. *Environ. Earth Sci.* 77, 774.
- Zuska, Z., Kopcinska, J., Dacewicz, E., Skowera, B., Wojkowski, J., and Ziernicka-Wojtaszek, A., 2019. Application of the principal component analysis (PCA) method to assess the impact of meteorological elements on concentrations of particulate matter (PM₁₀): A case study of the mountain valley (the Sacz Basin, Poland). *Sustainability (Switzerland)*, 11 (23), 6748.