

PEMODELAN KUALITAS UDARA AMBIEN DI KAWASAN SEKITAR PELABUHAN BATU BARA KABUPATEN TAPIN MENGUNAKAN AERMOD

AMBIENT AIR QUALITY MODELING AROUND THE COAL PORT AREA IN TAPIN REGENCY USING AERMOD

Ramadhani ¹, Sudiro ², Hardianto ³

Program Studi Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Malang

Jl. Bendungan Sigura-gura No.2, Sumber Sari, Lowokwaru, Kota Malang

Email: ¹⁾ ramadhani.bagan@gmail.com, ²⁾ sudiro_enviro@lecturer.itn.ac.id,

³⁾ hardianto_itn@yahoo.com

ABSTRAK: Aktivitas bongkar muat di Pelabuhan Batu Bara Desa Sungai Puting, Kabupaten Tapin, menghasilkan emisi partikulat seperti TSP dan PM₁₀ yang berisiko bagi kesehatan dan lingkungan. Penelitian ini bertujuan memodelkan pola persebaran TSP dan PM₁₀ di sekitar Pelabuhan Batu Bara Desa Sungai Puting, Kabupaten Tapin, sebagai dasar ilmiah untuk strategi pengendalian pencemaran. Pemodelan dispersi dilakukan menggunakan perangkat lunak AERMOD dengan data emisi dari PT. Sucofindo dan data meteorologi dari Climate Data Store. Validasi model dilakukan melalui pengukuran lapangan selama tiga hari menggunakan High Volume Air Sampler (HVAS). Hasil pemodelan menunjukkan konsentrasi partikulat tertinggi berada di dekat sumber emisi, dengan puncak mencapai 454,6 µg/m³ untuk TSP dan 246 µg/m³ untuk PM₁₀, yang dipengaruhi secara signifikan oleh faktor meteorologi. Meskipun hasil pengukuran di titik reseptor masih di bawah baku mutu PPRI Nomor 22 Tahun 2021, validasi model menggunakan Index of Agreement (IOA) menghasilkan nilai 0,99 untuk TSP dan PM₁₀. Hal ini menunjukkan akurasi AERMOD yang sangat tinggi dalam mengidentifikasi area berisiko dan efektivitasnya sebagai alat untuk merumuskan kebijakan pengendalian kualitas udara.

Kata Kunci: AERMOD, TSP, PM₁₀, Pelabuhan Batu Bara, Kualitas Udara, Dispersi Partikulat

ABSTRACT: Loading and unloading activities at the Coal Port in Sungai Puting Village, Tapin Regency, generate particulate emissions such as TSP and PM₁₀, posing risks to both health and the environment. This study aims to model the dispersion patterns of TSP and PM₁₀ around the Coal Port in Sungai Puting Village, Tapin Regency, to provide a scientific basis for pollution control strategies. The dispersion modeling was conducted using AERMOD software, with emission data obtained from PT. Sucofindo and meteorological data from the Climate Data Store. Model validation was performed through field measurements over three days using a High Volume Air Sampler (HVAS). The modeling results indicated that the highest particulate concentrations occurred near the emission Source, peaking at 454.6 µg/m³ for TSP and 246 µg/m³ for PM₁₀, significantly influenced by meteorological factors. Although the measured concentrations at receptor points remained below the ambient air quality standards stipulated in Government Regulation No. 22 of 2021, model validation using the Index of Agreement (IOA) yielded values of 0.99 for both TSP and PM₁₀. These results demonstrate the high accuracy of AERMOD in identifying high-risk areas and its effectiveness as a tool for formulating air quality control policies.

Keywords: AERMOD, TSP, PM₁₀, Coal Port, Air Quality, Particulate Dispersion

PENDAHULUAN

Pencemaran udara merupakan salah satu isu lingkungan yang memberikan dampak signifikan terhadap kesehatan manusia dan keseimbangan ekosistem. Menurut data Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), sekitar 99% populasi dunia menghirup udara yang kualitasnya melebihi ambang batas aman, terutama di negara berpenghasilan rendah dan menengah (Alim et al., 2024). Salah satu kontributor utama pencemaran udara adalah aktivitas bongkar muat batu bara di pelabuhan, yang menghasilkan partikel debu berbahaya seperti PM₁₀ dan *Total Suspended Particulate* (TSP), yang dapat menembus sistem pernapasan dan memicu gangguan kesehatan (Fahlevi et al., 2024; Rachman, 2024).

Berbagai penelitian mencatat bahwa konsentrasi partikulat di area pelabuhan sering kali melebihi baku mutu udara ambien. Misalnya, konsentrasi PM₁₀ di proyek konstruksi Depok tercatat mencapai 159,43 µg/m³, jauh di atas batas 75 µg/m³ (F & Umar, 2020), sementara konsentrasi debu di pelabuhan Muaro Jambi mencapai 7,98–10,00 mg/m³, melampaui batas 0,9 mg/m³ (Susanto et al., 2023). Data dari PT. Winner Prima Sekata juga melaporkan peningkatan kasus ISPA yang diduga akibat paparan debu batu bara. Selain itu, faktor meteorologi seperti kecepatan angin dan curah hujan turut memengaruhi distribusi partikulat (Dwicahya & Cahyonugroho, 2024; Nuryanto et al., 2021; Muhaniroh & Syech, 2021).

Untuk menganalisis penyebaran polutan, pendekatan berbasis model seperti AERMOD digunakan. AERMOD merupakan model dispersi Gaussian yang dikembangkan oleh U.S. EPA dan telah terbukti akurat dalam memprediksi distribusi PM₁₀ di berbagai wilayah (Wangsa et al., 2022; Futari & Ali, 2025). Meskipun demikian, kajian mengenai pencemaran udara akibat aktivitas bongkar muat batu bara masih terbatas di beberapa wilayah, termasuk Pelabuhan Batu Bara Desa Sungai Puting, Kalimantan Selatan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola penyebaran PM₁₀ dan TSP di kawasan tersebut menggunakan model AERMOD, guna mendukung strategi

pengendalian pencemaran udara yang berbasis data ilmiah.

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif untuk memodelkan sebaran *Total Suspended Particulate* (TSP) dan *Particulate Matter* 10 (PM₁₀) di sekitar Pelabuhan Batu Bara Desa Sungai Puting, Kabupaten Tapin, Kalimantan Selatan. Data primer diperoleh melalui pengukuran langsung selama tiga hari menggunakan High Volume Air Sampler (HVAS), dengan acuan SNI 7119-3:2017 dan SNI 7119.15:2016. Data sekunder berupa data emisi diperoleh dari PT. Sucofindo, sedangkan data meteorologi dikumpulkan dari *Climate Data Store* dan *Weather Query Builder*.

Pemodelan dispersi dilakukan menggunakan perangkat lunak AERMOD, yang terdiri atas tiga komponen utama: AERMOD, AERMET (pengolah data meteorologi), dan AERMAP (pengolah topografi). Validasi hasil pemodelan dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi AERMOD terhadap data lapangan menggunakan metode *Index of Agreement* (IOA).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran konsentrasi TSP dan PM₁₀ pada awal penelitian bertujuan untuk proses validasi model AERMOD. Lokasi penelitian berada pada koordinat (Lat: - 2.937035, Long: 114.903272). Lokasi titik pengukuran (Reseptor) berjarak 476,8m dari sumber pencemar (*Source*). Hasil pengukuran selama 3 hari dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengukuran TSP dan PM₁₀

Tanggal	Hasil	
	TSP	PM ₁₀
23 – 24	12	5
24 – 25	5	2
26 – 26	15	8
Baku Mutu	230	75

Satuan	µg/Nm ³	
--------	--------------------	--

Sumber: Hasil Pengukuran, 2024

Berdasarkan Tabel 1, menunjukkan bahwa kadar partikulat tersebut masih berada dalam kategori aman dan tidak melebihi batas baku mutu yang telah ditetapkan dalam

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia (PPRI) Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VII tentang baku mutu udara ambien.

Pemodelan AERMOD Data Meteorologi Source

Data meteorologi digunakan dan diolah terlebih dahulu dengan AERMET untuk menghasilkan data *file surface* (.sfc) dan *profile* (.pfl) yang diperlukan dalam pemodelan menggunakan AERMOD. Data meteorologi Source diperoleh dari website *Climate Data Store* dan *Weather Query Builder* yang dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2. Data cuaca Source pada tanggal 23 – 24 Desember.

Hours	Parameter								
	Temp (°C)	Pressure (hPa)	Humidity (%H)	Wind Speed (m/s)	Tutupan Awan (Tenths)	Ketinggian Awan (m)	Curah Hujan (mm)	Radiasi Matahari (Wh/m ²)	Weather
Min	25,7	100543,7	74,5	0	0,61	62,6	0,00021	420,5	
Max	32,8	100997,8	94,4	20,5	1,00	574,1	332100	434,6	Cloudy
Average	27,8	100836,1	87,4	8	0,95	276,2	26334	426,5	

Sumber: *Climate Data Store dan Weather Query Builder*, 2024

Tabel 3. Data cuaca Source pada tanggal 24 – 25 Desember.

Hours	Parameter								
	Temp (°C)	Pressure (hPa)	Humidity (%H)	Wind Speed (m/s)	Tutupan Awan (Tenths)	Ketinggian Awan (m)	Curah Hujan (mm)	Radiasi Matahari (Wh/m ²)	Weather
Min	24,9	100642,8	73,6	5,6	1,00	51,3	0,00104	406,8	
Max	30,7	101077,8	95,2	17,5	1,00	1313	239300	446,1	Rainy
Average	26,8	100892,8	88,0	10,2	1,00	410,921	27509	422,8	

Sumber: *Climate Data Store dan Weather Query Builder*, 2024

Tabel 4. Data cuaca Source pada tanggal 24 – 25 Desember.

Hours	Parameter								
	Temp (°C)	Pressure (hPa)	Humidity (%H)	Wind Speed (m/s)	Tutupan Awan (Tenths)	Ketinggian Awan (m)	Curah Hujan (mm)	Radiasi Matahari (Wh/m ²)	Weather
Min	24,9	100642,8	73,6	5,6	1,00	51,3	0,00104	406,8	
Max	30,7	101077,8	95,2	17,5	1,00	1313	239300	446,1	Rainy
Average	26,8	100892,8	88,0	10,2	1,00	410,921	27509	422,8	

Sumber: *Climate Data Store dan Weather Query Builder*, 2024

Berdasarkan tabel 2, 3 dan 4, diketahui bahwa pada hari pertama kondisi cuaca dominan berawan kemudian pada hari kedua kondisi cuaca dominan hujan dan pada hari ketiga kondisi cuaca dominan cerah.

Tabel 5. Data Kecepatan Angin pada tanggal 23 – 26 Desember 2024

No	Hours	23 - 24	24 - 25	25 - 26
Wind Speed (m/s)				
1	1.00 AM	11,2	11,2	9,4
2	2.00 AM	20,5	9,4	5,4
3	3.00 AM	14,8	14,8	5,4
4	4.00 AM	9,4	11,2	5,4
5	5.00 AM	9,4	11,2	5,4
6	6.00 AM	5,4	9,4	5,4
7	7.00 AM	5,4	11,2	5,4
8	8.00 AM	3,6	17,5	3,6
9	9.00 AM	0,0	11,2	3,6
10	10.00 AM	3,6	7,6	2,7
11	11.00 AM	4,5	5,6	2,7
12	12.00 PM	3,6	6,5	3,6
13	1.00 PM	3,6	7,6	3,6
14	2.00 PM	8,5	8,5	9,4
15	3.00 PM	6,5	6,5	5,4
16	4.00 PM	4,5	7,6	7,6
17	5.00 PM	7,6	9,4	9,4
18	6.00 PM	7,6	9,4	9,4
19	7.00 PM	9,4	13,0	9,4
20	8.00 PM	5,4	11,2	9,4
21	9.00 PM	14,8	9,4	5,4
22	10.00 PM	11,2	9,4	7,6
23	11.00 PM	11,2	11,2	7,6
24	12.00 AM	9,4	14,8	7,6
MIN		0,0	5,6	2,7
MAX		20,5	17,5	9,4
AVERAGE		8,0	10,3	6,1

Sumber: *Climate Data Store dan Weather Query Builder*, 2024

Berdasarkan tabel 5 diketahui kecepatan angin rata – rata dominan lebih cepat pada hari kedua dengan kecepatan 10,3 m/s.

Travelling Time

Kecepatan angin berpengaruh terhadap waktu tempuh (*traveling time*) TSP dan PM10 dari sumber ke reseptor. (Dwicahya & Cahyonugroho, 2024) menyebutkan bahwa “kecepatan angin tinggi mempercepat penyebaran polutan”. Untuk mengetahui pola penyebaran di Pelabuhan Batu Bara Desa Sungai Puting, dilakukan perhitungan *traveling time* berdasarkan kecepatan angin selama 23–26 Desember. Perhitungan dilakukan dengan rumus :

$$t = d/v$$

Dimana :

- t = waktu tempuh partikel (detik)
- d = jarak dari Source ke reseptor
- v = kecepatan angin (m/s)

Hasil perhitungan *traveling time* dapat dilihat pada tabel sebagai berikut :

Tabel 6. *Traveling time* 23 – 24

Kecepatan Angin (m/s)	Traveling time (menit)
Minimum (0)	0
Maksimum (20,5)	0,38
Rata – rata (8)	0,97

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Tabel 7. *Traveling time* 24 – 25

Kecepatan Angin (m/s)	<i>Traveling time</i> (menit)
Minimum (5,6)	1,39
Maksimum (17,5)	0,45
Rata – rata (10,3)	0,76

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Tabel 8. *Traveling time* 25 – 26

Kecepatan Angin (m/s)	<i>Traveling time</i> (menit)
Minimum (2,7)	2,89
Maksimum (9,4)	0,83
Rata – rata (6,1)	1,28

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berdasarkan tabel 6, 7 dan 8, diketahui bahwa *traveling time* paling minimum dan maksimum berada pada hari pertama.

Data Emisi Source

Data emisi digunakan sebagai sumber untuk melakukan pemodelan menggunakan perangkat lunak AERMOD. Data *emission rate* dapat dilihat pada tabel 9.

Tabel 9. Data *Emission Rate*

Tanggal	Parameter	
	TSP	PM ₁₀
23 – 24 Desember 2024	0,000128544 g/s	0,00006727 g/s
24 – 25 Desember 2024	0,000060255 g/s	0,00002009 g/s
25 – 26 Desember 2024	0,000155659 g/s	0,00008436 g/s

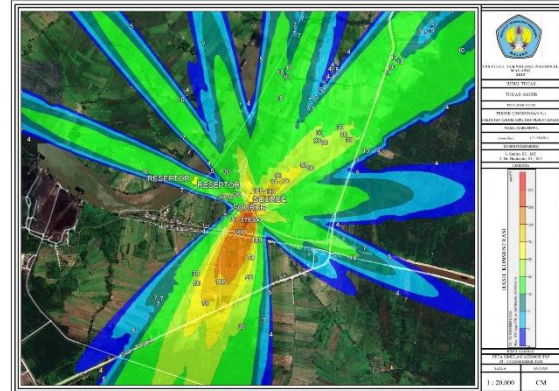
Sumber: Data *Emission Rate*, 2025

Berdasarkan tabel 9, hasil analisis menunjukkan bahwa rata-rata nilai emisi TSP selama periode pengukuran di pelabuhan batubara adalah 0.000114819 g/s, dengan nilai minimum sebesar 0.000060255 g/s pada 24 – 25 Desember 2024 dan nilai maksimum 0.000155659 g/s pada 25 – 26 Desember 2024. Sementara itu, nilai rata-rata emisi PM₁₀ adalah 0.00005724 g/s, dengan nilai minimum 0.00002009 g/s dan nilai maksimum 0.00008436 g/s. Fluktuasi nilai ini dapat dikaitkan dengan variasi intensitas kegiatan bongkar muat dan faktor lingkungan selama periode tersebut. Nilai-nilai emisi ini dapat digunakan sebagai dasar dalam pemodelan AERMOD untuk memperkirakan sebaran polutan di sekitar pelabuhan.

Pemodelan TSP

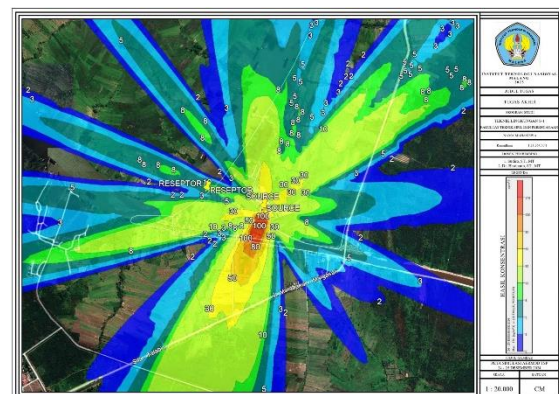
Skenario pemodelan dilakukan untuk memahami sebaran konsentrasi TSP dalam periode tertentu. Simulasi dilakukan

menggunakan perangkat lunak AERMOD untuk menghitung sebaran konsentrasi TSP pada tanggal 23 – 26 Desember 2024 di pelabuhan batu bara. Hasil simulasi kemudian diekspor ke *Google Earth Pro* guna memberikan visualisasi yang lebih jelas dan detail mengenai pola penyebaran polutan di area sekitar pelabuhan. Berikut hasil dari simulasi dari AERMOD :



Gambar 1. Visualisasi Sebaran Konsentrasi TSP di *Google Earth Pro* Pada 23 – 24 Desember 2024

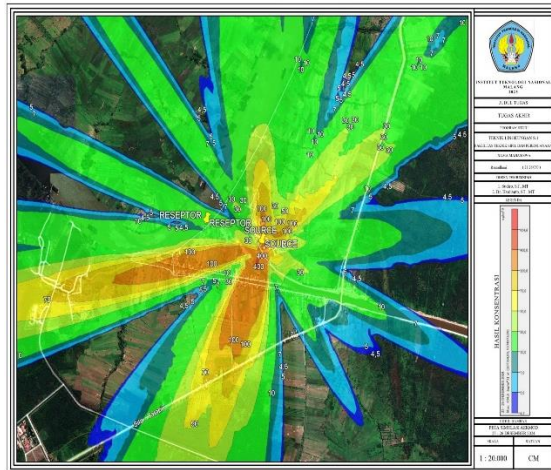
Berdasarkan gambar 1 diketahui bahwa konsentrasi terendah berkisar antara 0 – 4 µg/m³, ditandai dengan warna biru tua, yang menunjukkan kualitas udara sangat bersih. Konsentrasi menengah mulai terlihat di kisaran 10 – 30 µg/m³ dengan warna kuning muda, dan 30 – 50 µg/m³ yang berwarna kuning. Dua tingkatan tertinggi adalah 100 – 300 µg/m³ dengan warna merah muda dan 300 – 375 µg/m³ dengan warna merah, menunjukkan lokasi dengan konsentrasi partikulat paling tinggi dalam persebaran ini.



Gambar 2. Visualisasi Sebaran Konsentrasi TSP di *Google Earth Pro*, AERMOD 24 – 25 Desember 2024

Berdasarkan gambar 2 diketahui bahwa konsentrasi terendah berkisar antara 0 – 2

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, ditandai dengan warna biru tua, yang menunjukkan kualitas udara sangat bersih. Konsentrasi menengah mulai terlihat di kisaran $8 - 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan warna kuning muda, dan $10 - 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ yang berwarna kuning. Dua tingkatan tertinggi adalah $80 - 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan warna merah muda dan $100 - 176 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan warna merah, menunjukkan lokasi dengan konsentrasi partikulat paling tinggi dalam persebaran ini.

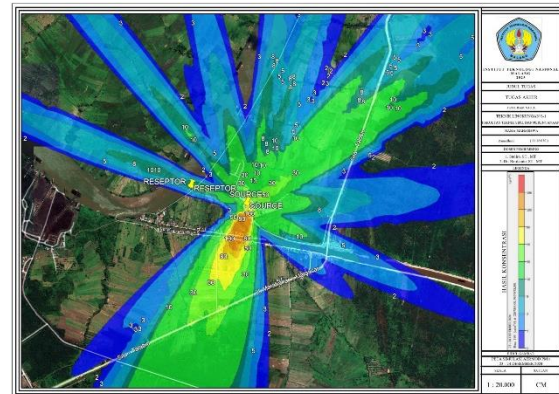


Gambar 3. Visualisasi Sebaran Konsentrasi TSP di *Google Earth Pro*, AERMOD 25 – 26 Desember 2024

Berdasarkan gambar 3 diketahui bahwa konsentrasi terendah berkisar antara $0 - 4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ditandai dengan warna biru tua, yang menunjukkan kualitas udara sangat bersih. Konsentrasi menengah mulai terlihat di kisaran $10 - 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan warna kuning muda, dan $30 - 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ yang berwarna kuning. Dua tingkatan tertinggi adalah $100 - 400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan warna merah muda dan $400 - 454,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan warna merah, menunjukkan lokasi dengan konsentrasi partikulat paling tinggi dalam persebaran ini.

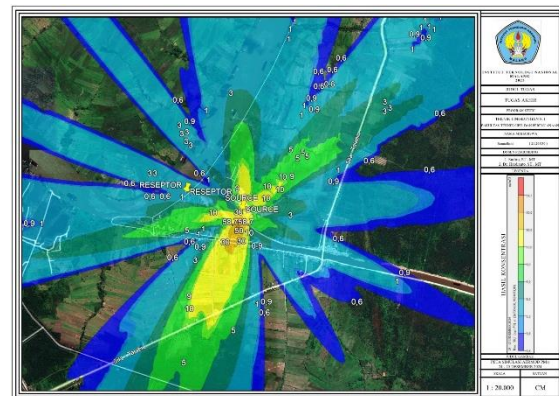
Pemodelan PM10

Skenario pemodelan dilakukan untuk memahami sebaran konsentrasi PM10 dalam periode tertentu. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak AERMOD untuk menghitung sebaran konsentrasi TSP pada tanggal 23 – 26 Desember 2024 di pelabuhan batu bara. Hasil simulasi kemudian diekspor ke *Google Earth Pro* guna memberikan visualisasi yang lebih jelas dan detail mengenai pola penyebaran polutan di area sekitar pelabuhan. Berikut hasil dari simulasi dari AERMOD :



Gambar 4. Visualisasi Sebaran Konsentrasi PM10 di *Google Earth Pro*, AERMOD 23 – 24 Desember 2024

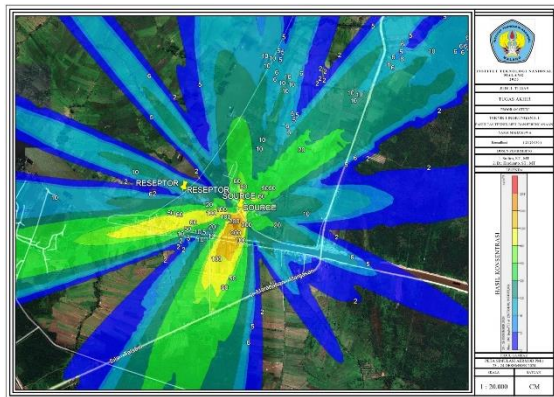
Berdasarkan gambar 4 diketahui bahwa konsentrasi terendah berkisar antara $0 - 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ditandai dengan warna biru tua, yang menunjukkan kualitas udara sangat bersih. Konsentrasi menengah mulai terlihat di kisaran $8 - 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan warna kuning muda, dan $10 - 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ yang berwarna kuning. Dua tingkatan tertinggi adalah $80 - 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan warna merah muda dan $100 - 196 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan warna merah, menunjukkan lokasi dengan konsentrasi partikulat paling tinggi dalam persebaran ini.



Gambar 5. Visualisasi Sebaran Konsentrasi PM10 di *Google Earth Pro*, AERMOD 24 – 25 Desember 2024

Berdasarkan gambar 4 diketahui bahwa konsentrasi terendah berkisar antara $0 - 0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ditandai dengan warna biru tua, yang menunjukkan kualitas udara sangat bersih. Konsentrasi sedikit lebih tinggi, antara $0,6 - 0,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ditunjukkan dengan warna biru muda. Konsentrasi menengah mulai terlihat di kisaran $3 - 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan warna kuning muda, dan $5 - 9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ yang berwarna kuning. Dua tingkatan tertinggi adalah $30 - 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan warna merah muda dan $50 - 58,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan warna

merah, menunjukkan lokasi dengan konsentrasi partikulat paling tinggi dalam persebaran ini.



Gambar 6. Visualisasi Sebaran Konsentrasi PM10 di Google Earth Pro, AERMOD 25 – 26 Desember 2024

Berdasarkan gambar 6 diketahui bahwa konsentrasi terendah berkisar antara 0 – 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ditandai dengan warna biru tua, yang menunjukkan kualitas udara sangat bersih. Konsentrasi menengah mulai terlihat di kisaran 10 – 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan warna kuning muda, dan 20 – 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ yang berwarna kuning. Dua tingkatan tertinggi adalah 100 – 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan warna merah muda dan 200 – 246 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan warna merah, menunjukkan lokasi dengan konsentrasi partikulat paling tinggi dalam persebaran ini.

Nilai Konsentrasi Hasil Pemodelan AERMOD

Setelah dilakukan pemodelan, maka hasil konsentrasi reseptor dapat dilihat besarnya dalam tabel 10 sebagai berikut:

Tabel 10. Nilai Konsentrasi Hasil Pemodelan

Tanggal	Parameter	
	TSP	PM10
23 – 24	12,8	6,7
24 – 25	6	2
25 – 26	15,5	8,4
Satuan	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	

Berdasarkan tabel 10, diketahui konsentrasi TSP dan PM10 paling tinggi berada pada hari ketiga, konsentrasi terendah pada hari kedua dan konsentrasi menengah pada hari pertama.

Validasi Model

Proses validasi model dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi hasil simulasi AERMOD dengan membandingkan data model

dengan data aktual. Validasi ini menggunakan *Index of Agreement* (IOA). Hasil uji *Index of Agreement* (IOA) TSP dapat dilihat pada tabel 11 dan 12 sebagai berikut :

Tabel 11. Hasil Uji IOA TSP

TSP				
Titik	Keterangan	Actual Data (At)	Simulated Data (St)	IOA
1	Reseptor	12	12,8	0,99
2	Reseptor	5	6	
3	Reseptor	15	15,5	
IOA				0,99

Sumber: Hasil Uji IOA, 2025

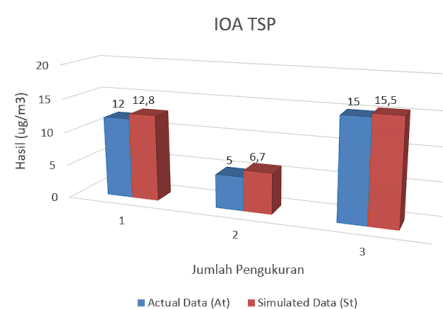
Tabel 12. Hasil Uji IOA PM10

PM10				
Titik	Keterangan	Actual Data (At)	Simulated Data (St)	IOA
1	Reseptor	5	6,7	0,99
2	Reseptor	2	2	
3	Reseptor	8	8,4	
IOA				0,99

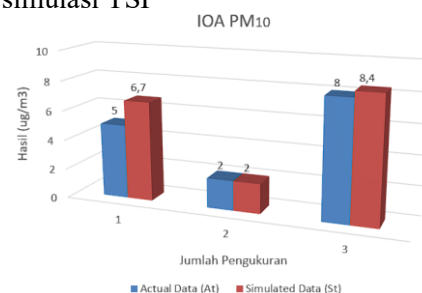
Sumber: Hasil Uji IOA, 2025

Berdasarkan hasil pengujian IOA pada tabel 11 dan 12, nilai IOA yang diperoleh adalah 0,99. Nilai ini termasuk dalam kategori sangat baik karena sangat dekat dengan nilai maksimum ($d = 1$), sehingga menunjukkan bahwa data aktual dan data simulasi memiliki tingkat kesesuaian yang sangat tinggi.

Perbandingan data aktual dan data simulasi TSP dan PM10 dibuat dalam grafik dan dapat dilihat pada gambar 7 dan 8 :



Gambar 7. Grafik Perbandingan data aktual dan data simulasi TSP



Gambar 8. Grafik Perbandingan data aktual dan data simulasi PM10

Validasi model dilakukan untuk mengetahui tingkat keakuratan suatu model dibandingkan dengan data eksisting. Dalam validasi menggunakan *Index of Agreement (IOA)*, nilai berkisar antara 0 hingga 1, yang menunjukkan tingkat kesalahan prediksi dalam model. Semakin besar nilai IOA yang diperoleh, maka semakin akurat model tersebut. Nilai IOA antara 0,5 hingga 1 mengindikasikan bahwa model tergolong baik, sedangkan nilai IOA antara 0 hingga 0,4 menunjukkan bahwa model kurang baik (Setyo & Handriyono, 2021).

Menurut (L. Huang et al., 2021), nilai *R* dan *Index of Agreement (IOA)* yang mendekati 1 menunjukkan kinerja model yang sangat baik, sedangkan nilai yang mendekati 0 menunjukkan kinerja yang buruk. Hasil pemodelan menggunakan AERMOD menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan data aktual, dengan nilai IOA sebesar 0,99 untuk parameter TSP dan PM₁₀. Nilai ini mencerminkan bahwa model simulasi memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi dalam memprediksi persebaran partikulat.

Analisis Hasil Pemodelan TSP dan PM₁₀

Perbedaan konsentrasi dari ketiga periode dipengaruhi oleh faktor meteorologis. diketahui ketiga periode memiliki kondisi cuaca yang berbeda. Periode pertama dengan kondisi cuaca berawan, periode kedua dengan kondisi cuaca didominasi hujan dan periode ketiga kondisi cuaca cerah.

Hal ini menyebabkan adanya perbedaan yang terlihat jelas pada hasil pemodelan dari ketiga periode karena cuaca juga berperan penting dalam pola persebaran debu, contohnya adalah periode kedua yang memiliki konsentrasi yang paling kecil dibanding dua periode lainnya baik di TSP maupun PM₁₀ karena pada saat itu kondisi cuaca yang didominasi oleh hujan sehingga debu berkurang dan konsentrasi menjadi kecil.

Hal ini sejalan oleh beberapa studi atau penelitian seperti studi oleh (Pratama & Sofyan, 2020) menunjukkan bahwa curah hujan dapat melarutkan polutan di atmosfer melalui proses *wet deposition*, sehingga mengurangi konsentrasi partikulat di udara. Temuan serupa disampaikan oleh (Perdana et al., 2023) , yang

menyatakan bahwa saat hujan turun, partikel debu yang melayang di udara akan ikut terbawa oleh air hujan dan jatuh ke permukaan tanah, menjadikan kondisi atmosfer lebih bersih. Kondisi cuaca juga mempengaruhi suhu dan kelembaban pada hari itu. Periode pertama diketahui memiliki suhu rata – rata harian sebesar 27,8°C dan kelembaban rata – rata harian sebesar 87,4%H.

Pada periode kedua suhu rata – rata harian sebesar 26,8°C dan kelembaban rata – rata harian sebesar 88%H dan pada periode ketiga diketahui suhu rata – rata harian sebesar 28,1°C dan kelembaban rata – rata harian sebesar 84,9%H. Perbedaan suhu dan kelembaban ini dapat juga mempengaruhi besar atau kecilnya konsentrasi karena suhu yang tinggi dapat menyebabkan konsentrasi polutan meningkat begitu juga sebaliknya dan kelembaban yang tinggi menyebabkan konsentrasi polutan menjadi rendah. Pada penelitian ini dapat dilihat bahwa periode ketiga memiliki konsentrasi yang paling tinggi dari pada periode lainnya karena suhu pada hari itu lebih tinggi dan kelembaban yang lebih rendah.

Hal ini juga didukung oleh beberapa studi seperti (Syafaati et al., 2023), yang menyatakan bahwa pada suhu tinggi, partikel debu menjadi lebih ringan sehingga cenderung bertahan lebih lama di atmosfer dalam kondisi turbulen. Sebaliknya, pada suhu rendah, partikel menjadi lebih berat dan lebih cepat mengendap ke permukaan, sehingga jumlah partikel debu yang terdeteksi oleh alat pemantau menjadi lebih sedikit. Selain itu, mereka juga menyatakan bahwa ketika kelembaban udara relatif menurun, konsentrasi partikulat di udara akan meningkat. Temuan ini sejalan dengan studi yang dilakukan oleh (Nuryanto et al, 2021) , yang menyatakan bahwa kelembaban udara yang tinggi dapat mengurangi dispersi partikulat di udara.

Kecepatan dan arah angin juga termasuk faktor penting dalam penyebaran debu polutan karena faktor ini yang akan membawa debu dari sumber ke segala arah. Kecepatan angin rata – rata pada periode pertama adalah 8 m/s, periode kedua 10,3 m/s dan periode ketiga 6,1 m/s. Menurut (Saragih et al., 2022), kecepatan angin yang tinggi dapat menyebabkan debu dan partikel di permukaan

lebih mudah terangkat ke atmosfer dan terbawa oleh aliran udara. Pada periode kedua, kecepatan angin rata – rata lebih tinggi karena didukung oleh faktor hujan yang mendominasi pada hari itu. Namun meski kecepatannya lebih tinggi dibandingkan periode lainnya konsentrasinya tidak berarti menjadi yang paling tinggi, karena angin hanya salah satu faktor dalam tinggi rendahnya konsentrasi polutan.

Arah angin juga mempunyai pengaruh dalam penyebaran polutan. Contohnya pada pemodelan periode pertama TSP pada periode pertama, arah angin dominan ke arah selatan sehingga arah selatan mempunyai konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan arah lainnya, hal ini juga dipengaruhi oleh jarak. Pada periode ketiga, konsentrasi TSP pada daerah *Source* berada di angka 400 – 454,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ lalu menurun secara bertahap hingga 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ke arah utara, hingga 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ke arah tenggara, dan hingga 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ke arah Selatan. Dengan radius 1km pada setiap penurunan konsentrasi.

Menurut (Adriani, 2020), variasi konsentrasi debu dipengaruhi oleh jarak dari sumber emisi, yang berkaitan erat dengan kemampuan angin dalam mengangkut partikel debu. Semakin jauh jaraknya, konsentrasi debu akan semakin menurun karena kecepatan angin yang berkurang menyebabkan daya angkut partikel menjadi semakin lemah.

Skenario Pengendalian Pencemaran Udara

Hasil pemodelan dispersi dalam penelitian ini menjadi landasan ilmiah untuk menyusun skenario pengendalian pencemaran udara yang efektif. Berikut adalah beberapa skenario yang dapat dikembangkan dari analisis ini :

Teknologi Penyiraman dan Kabut Air (*Water Spraying and Misting*), metode ini adalah yang paling umum dan mendasar untuk menekan debu di area terbuka. Air disemprotkan untuk membasahi material batu bara dan permukaan jalan, mencegah partikel debu beterbangan. Untuk debu yang sudah beterbangan, kabut air (*water mist*) dengan ukuran tetesan kecil dapat menangkap partikel debu di udara dan membuatnya jatuh ke tanah..

Efisiensi penyiraman dengan air biasa untuk menekan debu dapat mencapai 95%,

namun perlu diaplikasikan secara berkala, misalnya setiap 0,5 jam, untuk menjaga kelembapan permukaan. Meningkatkan kadar air material hingga 4% juga dapat mengurangi debu sebesar 75% (Colinet et al., 2021). Contohnya pada periode pertama, konsentrasi TSP tertinggi berada pada arah selatan sebesar 375 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, setelah metode ini diterapkan konsentrasi dapat menurun hingga 93,75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Efektivitas kabut air dalam menekan total debu berkisar antara 30,3% hingga 93%, tergantung pada desain sistem, tekanan, dan kondisi lingkungan (Cheng et al., 2020). Contohnya pada periode ketiga salah satu konsentrasi TSP pada arah utara sebesar 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, setelah metode ini diterapkan konsentrasi dapat menurun hingga 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Menambahkan agen pembasah (surfaktan) pada air semprotan dapat meningkatkan efisiensi penekanan debu secara signifikan. Riset menunjukkan penambahan agen pembasah meningkatkan efisiensi penyemprotan sebesar 15% hingga 20% dibandingkan air biasa (Huang et al., 2024). Contohnya pada periode kedua, konsentrasi PM10 tertinggi berada pada arah timur laut sebesar 58,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, setelah metode ini diterapkan konsentrasi dapat menurun hingga 2,93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Hasil Pengukuran dan Pemodelan

Keberadaan polutan udara di lingkungan dapat dipengaruhi oleh kondisi meteorologis baik berperan sebagai penghambat atau pemicu pembentukan polutan (Serlina, 2020). Menurut (Pratama & Sofyan, 2020) pada dasarnya, arah persebaran dan tingkat konsentrasi polutan di atmosfer sangat dipengaruhi oleh faktor meteorologi seperti arah dan kecepatan angin, curah hujan, temperatur, dan sebagainya. Hasil pengukuran TSP dan PM10 selama tiga hari pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi partikulat masih berada di bawah baku mutu yang ditetapkan oleh Peraturan Pemerintah Republik Indonesia (PPRI) Nomor 22 Tahun 2021. Berikut adalah hasil pengukuran dan hasil pemodelan AERMOD yang dapat dilihat pada tabel

Tanggal	TSP		PM10	
	Hasil Pengukuran	Hasil Pemodelan	Hasil Pengukuran	Hasil Pemodelan
23 – 24	12	12,8	5	6,7
24 – 25	5	6	2	2
26 – 26	15	15,5	8	8,4
Baku Mutu	230		75	

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Analisis *Traveling time*

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, waktu tempuh TSP dan PM10 dari sumber ke reseptor bervariasi antara 0,38 menit hingga 2,89 menit, tergantung pada kecepatan angin harian selama periode 23–26 Desember 2024. Pada 23 –24 Desember, kecepatan angin minimum, rata-rata, dan maksimum berturut-turut adalah 0 m/s, 8 m/s, dan 20,5 m/s, sehingga waktu tempuh polutan berkisar antara 0,97 menit hingga 0,38 menit.

Pada 24 – 25 Desember, kecepatan angin minimum, rata-rata, dan maksimum berturut-turut adalah 5,6 m/s, 10,3 m/s, dan 17,5 m/s, menyebabkan waktu tempuh polutan berkisar antara 1,39 menit hingga 0,45 menit. Pada 25 – 26 Desember kecepatan minimum 2,7 m/s, rata-rata 6,1 m/s, dan maksimum 9,4 m/s, sehingga waktu tempuh meningkat dari 2,89 menit hingga 0,83 menit.

Hasil ini menunjukkan bahwa kecepatan angin tinggi memungkinkan polutan mencapai pemukiman dalam waktu yang sangat singkat, meningkatkan risiko paparan bagi masyarakat sekitar. Penelitian yang dilakukan oleh (Susanto et al., 2023) di Pelabuhan Batu Bara Kabupaten Muaro Jambi menunjukkan bahwa konsentrasi debu di sekitar pelabuhan berkisar antara 7,98 hingga 10,00 mg/m³, jauh melebihi ambang batas baku mutu udara sebesar 0,9 mg/m³.

Sementara itu, studi oleh (Wangsa et al., 2022) menyatakan bahwa PM10 dapat berpindah dalam waktu kurang dari 10 menit pada kecepatan angin 5 m/s. Hasil ini sejalan dengan temuan dalam penelitian ini, di mana pada kecepatan angin antara 5,6 hingga 20,5 m/s, waktu tempuh (*traveling time*) partikulat tercatat antara 1,39 menit hingga 0,38 menit. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan angin berperan penting dalam menentukan kecepatan persebaran partikulat dari pelabuhan menuju area sekitarnya.

Kesimpulan

1. Pemodelan menggunakan AERMOD menunjukkan bahwa konsentrasi TSP dan PM10 tertinggi berada di sekitar sumber emisi (pelabuhan batu bara), dengan nilai konsentrasi TSP mencapai 375 µg/m³ pada hari pertama pengukuran, 176 µg/m³ pada hari kedua pengukuran, 454,6 µg/m³ pada hari ketiga pengukuran dan PM10 mencapai 196 µg/m³ pada hari pertama pengukuran, 58,7 µg/m³ pada hari kedua pengukuran, 246 µg/m³ pada hari ketiga pengukuran. Konsentrasi ini menurun seiring dengan bertambahnya jarak dari sumber emisi..
2. Kecepatan dan arah angin, curah hujan, suhu udara, dan kelembaban memiliki pengaruh signifikan terhadap penyebaran partikulat. Kecepatan angin yang tinggi dapat mempercepat penyebaran polutan, sedangkan curah hujan yang tinggi membantu mengendapkan partikulat dan mengurangi konsentrasi di udara.
3. Waktu tempuh partikulat dari sumber ke reseptor bervariasi antara 0,38 menit hingga 2,89 menit, tergantung pada kecepatan angin. Kecepatan angin tinggi memungkinkan polutan mencapai pemukiman dalam waktu singkat, meningkatkan risiko paparan bagi masyarakat sekitar.

Saran

1. Penelitian selanjutnya dapat menambah reseptor pada lokasi yang beresiko tinggi dan menambah durasi waktu pemodelan untuk meningkatkan akurasi prediksi penyebaran partikulat.

DAFTAR PUSTAKA

- Alim Chandra, Gultom Herwis, Mukthar Jazuli. (2024). Analisis Data Kualitas Udara di Indonesia Dengan K-MEANS Clustering Pada Bulan Agustus 2023. Prosiding Seminar Nasional Informatika Dan Sistem Informasi. 8(1);81-92.
- Fahlevi, M. I., Murdani, I., & Luthfi, F. (2024). Pengaruh Faktor Pengetahuan dan Lingkungan Terhadap Penyakit ISPA Di Area Pertambangan Batu Bara. Jurnal Kesehatan Tambusai.5(3);8582-8586.
- F, A. P. F. D. A., & Umar, F. A. (2020). Hubungan Konsentrasi Kadar Debu PM10 Dengan Kejadian Gejala ISPA

- (Infeksi Saluran Pernafasan Akut) pada Pekerja Proyek Konstruksi X di Depok Tahun 2018. *Jurnal Nasional Kesehatan Lingkungan Global*. 1;271-283.
- Susanto, W. P. A., Gusman, M., Dewata, I., Barlian, E., & Efendi, N. (2023). Analysis of Air and Water Quality at Coal Harbor in Muaro Jambi Regency. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*. 9(11);10484–10491
- Dwicahya, A. R., & Cahyonugroho, O. H. (2024). Analisis Sebaran Emisi *Total Suspended Particulate* Menggunakan Software AERMOD di Jalan Raya Tandes. *Jurnal Serambi Engineering*. IX(3);9907-9912.
- Nuryanto, Gultom, H. M., & Melinda, S. (2021). Pengaruh Angin Permukaan dan Kelembapan Udara Terhadap *Suspended Particulate Matter* (SPM) di Sorong Periode Januari – Juli 2019. *Buletin GAW Bariri*.2(2);71-78.
- Muhaniroh, & Syech, R. (2021). Analisis Pengaruh Suhu Udara, Curah Hujan, Kelembaban Udara Dan Kecepatan Angin Terhadap Arah Penyebaran Dan Akumulasi *Particulate Matter* (PM10): Studi Kasus Kota Pekanbaru. 18(1);48-57. *Komunikasi Fisika Indonesia*.
- Wangsa, D., Bachtiar, V. S., & Raharjo, S. (2022). Uji Model Aeromod Terhadap Sebaran *Particulate Matter* 10 μm (PM10) di Sekitar Kawasan PT Semen Padang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 20;291-301.
- Futari, M. Y. R., & Ali, M. (2025). Pemodelan Sebaran Polutan Udara dari Flarestack Menggunakan AERMOD di Onshore Receiving Facilities PT X. *Jurnal Serambi Engineering*. X(1); 11854 - 11864.
- Pratama, A., & Sofyan, A. (2020). Analisis Dispersi Pencemar Udara PM10 di kota Bandung Menggunakan Wrfchem Data Asimilasi. *Jurnal Teknik Lingkungan*.26(1);19-36.
- Perdana, A. R., Atira, I. P., & Yosafat, D. H. (2023). Analisis Konsentrasi PM10 DAN PM2.5 Pada Titik Pemantauan Bundaran Hi Jakarta Pusat Periode Data Februari-Oktober 2021. *Jurnal Kajian Ilmu Dan Pendidikan Geograf*, 6(1);1-8.
- Syafaati, A. D., Utami, S. N. N., & Arifin, S. (2023). Analisis Kualitas Udara Parameter PM2.5 Di Wilayah Kota Sorong Berbasis ISPU. *Megasains*, 14(2);6-13.
- Saragih Erly Esaputri, Jati Dian Rahayu & Pramadita Suci. (2022). Analisis Polutan Udara (CO, NO2, SO2, PM10, PM2,5 dan TSP) di Industri Galangan Kapal serta Pengaruhnya terhadap Lingkungan Kerja. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*. 10(2);129-138.
- Andriani. (2020). Analisis Pola Dispersi Polutan pada Kawasan Pabrik di Kecamatan Somba Opu. *Dewantara*. 1(1);12-17.
- Colinet, J. F., Halldin, C. N., & Schall, J. (2021). *Best Practices for Dust Control in Coal Mining*. In *DHHS (NIOSH) Publication No. 2021-119*.
- Cheng Weimin, Zhou Gang, & Chen Lianjun.(2020). *Research Progress and Prospect Of Dust Controll Theory and Technology in China's Coalmines in The Past 20 Years*. *Coal Science and Technology*.48(20);120.
- Huang, L., Zhu, Y., Zhai, H., Xue, S., Zhu, T., Shao, Y., Liu, Z., Emery, C., Yarwood, G., Wang, Y., Fu, J., Zhang, K., & Li, L. (2021). *Recommendations on benchmarks for numerical air quality model applications in China - Part 1: PM2.5 and chemical species*. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 21, 2725–2743
- Serlina, Y. (2020). Pengaruh Faktor Meteorologi Terhadap Konsentrasi NO 2 di Udara Ambien (Studi Kasus Bundaran Hotel Indonesia DKI Jakarta). *Serambi Engineering*. V(3);1228-1235.