

SKRIPSI

ANALISIS SEBARAN EMISI CEROBONG PT PERTAMINA EP DONGGI MATINDOK FIELD BERBASIS MODEL DISPERSI GAUSS



ATIKA MAHARANI KARTIKA PUTRI
D131191009

PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023





Optimized using
trial version
www.balesio.com

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS SEBARAN EMISI CEROBONG PT.PERTAMINA EP DONGGI MATINDOK *FIELD* BERBASIS MODEL DISPERSI GAUSS

Disusun dan diajukan oleh

Atika Maharani Kartika Putri
D131191009

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 24 Oktober 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Eng. Ir. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM.
NIP 197204242000122001

Pembimbing Pendamping,



Zarah Arwifeny Hanam, S.T., M.T.
NIP 199710272022044001

Ketua Departemen Teknik Lingkungan,



Dr. Eng. Ir. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM.
NIP 197204242000122001



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Atika Maharani Kartika Putri

NIM : D131191009

Program Studi : Teknik Lingkungan

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Analisis Sebaran Emisi Cerobong PT Pertamina EP Donggi Matindok Field
Berdasarkan Model Dispersi *Gauss*

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 24 Oktober 2023

Yang Menyatakan



Atika Maharani Kartika Putri



ABSTRAK

ATIKA MAHARANI KARTIKA PUTRI. *Analisis Sebaran Emisi Cerobong PT Pertamina EP Donggi Matindok Field Berbasis Model Dispersi Gauss* (dibimbing oleh Muralia Hustim dan Zarah Arwieny Hanami)

PT Pertamina EP Donggi Matindok Field merupakan industri migas yang kegiatan operasionalnya menggunakan cerobong asap dengan bahan bakar minyak sehingga menghasilkan polutan gas utama seperti Sulfur Dioksida (SO₂), Nitrogen Dioksida (NO₂), dan Partikulat yang berpotensi menimbulkan pencemaran udara. Oleh karena itu, upaya yang dapat dilakukan dengan pemantauan kualitas udara menggunakan pemodelan dispersi *Gauss*, dalam hal ini menggunakan *software* AERMOD View.

Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis model sebaran konsentrasi SO₂, NO₂, dan Partikulat menggunakan model AERMOD serta validasi model AERMOD yang dibandingkan dengan kondisi eksisting.

Data yang digunakan dalam penelitian adalah yaitu data emisi SO₂, NO₂, dan Partikulat di tujuh titik cerobong. Data sekunder terdiri dari data meteorologi per jam selama 24 jam dari Semester II 2020-Semester I 2023, data emisi Semester II 2020-Semester I 2022, spesifikasi cerobong, dan data pengukuran udara ambien.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola sebaran polutan SO₂, NO₂, maupun Partikulat sesuai dengan arah angin dominan pada *windrose*. Konsentrasi tertinggi SO₂ pada Semester II 2020 hingga Semester I 2023 berturut-turut sebesar 31,054 µg/m³; 529,873 µg/m³; 15 µg/m³; 434,951 µg/m³; 54,295; dan 0,535 µg/m³. Konsentrasi tertinggi untuk NO₂ pada Semester II 2020 hingga Semester I 2023 berturut-turut sebesar 287 µg/m³; 954,4 µg/m³; 99,6 µg/m³; 1121 µg/m³; 1016,82 µg/m³; dan 11,3 µg/m³. Konsentrasi tertinggi Partikulat pada Semester II 2020 hingga Semester I 2023 berturut-turut sebesar 78,3 µg/m³; 271 µg/m³; 0,142 µg/m³; 110 µg/m³; 361 µg/m³; dan 4,102 µg/m³. Hasil validasi menggunakan metode RMSE menunjukkan pemodelan AERMOD di Semester I 2021 untuk parameter SO₂ sebesar 23,29; NO₂ sebesar 18,73; dan Partikulat sebesar 14,02 dimana nilai tersebut <25 sehingga pemodelan AERMOD untuk ketiga parameter dapat diterima (*acceptable*).

Kata Kunci: Dispersi Gauss, AERMOD, Validasi RMSE



ABSTRACT

ATIKA MAHARANI KARTIKA PUTRI. *Analysis of Emission Distribution of PT Pertamina EP Donggi Matindok Field Based on Gaussian Dispersion Model* (supervised by Muralia Hustim and Zarah Arwienny Hanami)

PT Pertamina EP Donggi Matindok Field is an oil and gas industry whose operational activities use oil-fired chimneys to produce main gas pollutants such as Sulfur Dioxide (SO₂), Nitrogen Dioxide (NO₂), and Particulates which have the potential to cause air pollution. Therefore, efforts that can be made by monitoring air quality using Gaussian dispersion modeling, in this case using the AERMOD View software.

The purpose of this study was to analyze the concentration levels of SO₂, NO₂, and Particulates, to analyze the SO₂, NO₂, and particulate concentration distribution models using the AERMOD model, as well as to validate the AERMOD model compared to existing conditions.

The data used in this study namely SO₂, NO₂, and Particulate emission data at seven chimney points. Secondary data consists of hourly meteorological data for 24 hours from Semester II 2020-Semester I 2023, emission data for Semester II 2020-Semester I 2022, chimney specifications, and ambient air measurement data.

The results showed that the distribution pattern of SO₂, NO₂, and Particulates was in accordance with the dominant wind direction in windrose so that the areas exposed to maximum concentrations were residential areas, but the rest tended to be forest areas with no human activity. the highest concentration of SO₂ in Semester II 2020 to Semester I 2023 was 31.054 µg/m³; 529,873 µg/m³; 15 µg/m³; 434.951 µg/m³; 54,295; and 0.535 µg/m³. The highest concentration for NO₂ in Semester II 2020 to Semester I 2023 was 287 µg/m³; 954.4µg/m³; 99.6 µg/m³; 1121 µg/m³; 1016.82 µg/m³; and 11.3 µg/m³. The highest concentration of particulates in Semester II 2020 to Semester I 2023 was 78.3 µg/m³; 271 µg/m³; 0.142 µg/m³; 110 µg/m³; 361 µg/m³; and 4.102 µg/m³. The validation results using the RMSE method show that AERMOD modeling for the SO₂ parameter has an RMSE value of 23.29%; the NO₂ parameter has an RMSE value of 18.73%; and the Particulate parameter has an RMSE value of 14.028% where the value is <25% so that the AERMOD modeling for the three parameters is acceptable.

Keywords: Gaussian Dispersion, AERMOD, RMSE Validation



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
KATA PENGANTAR.....	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Udara.....	5
2.2 Pencemaran Udara	5
2.3 Sulfur Dioksida (SO ₂)	8
2.4 Nitrogen Dioksida (NO ₂)	9
2.5 Partikulat	9
2.6 Industri Minyak dan Gas	10
2.7 Dispersi Polutan	13
2.8 Model Dispersi Gauss	18
2.9 AERMOD	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1 Kerangka Penelitian	22
3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian	23
3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	27
3.5 Metode Pengambilan Data	28
3.6 Metode Pengolahan Data	34
3.6 Validasi Model RMSE	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	42
4.1 Hasil Pengukuran Emisi Tiap Semester.....	42
4.2 Hasil Laju Emisi.....	43
4.3 Hasil <i>Windrose</i>	46
4.4 Hasil Pemodelan AERMOD	48
4.5 Uji Validitas Model AERMOD dengan Metode <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE)	93
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	99
5.1 Kesimpulan	99
5.2 Saran	100
DAFTAR PUSTAKA	101



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Skema Emisi GRK Proses Produksi PT Pertamina EP Donggi Matindok Field	11
Gambar 2 <i>Plume Rise</i>	18
Gambar 3 Estimasi Dispersi di Atmosfer	19
Gambar 4 Bagan Alir Penelitian	22
Gambar 5 Peta Lokasi Penelitian	26
Gambar 6 Layout Titik Pengukuran	27
Gambar 7 Alat dan Bahan	27
Gambar 8 Flowchart Pengambilan Contoh Uji Partikulat	31
Gambar 9 Flowchart Pengambilan Contoh Uji SO ₂ dan NO ₂ menggunakan Gas Analyzer	32
Gambar 10 Flowchart Analisis Emisi SO ₂ dan NO ₂ di Laboratorium	33
Gambar 11 <i>Flowchart</i> Pengolahan Data Angin pada WRPLOT View	34
Gambar 12 Flowchart Pengolahan Data pada AERMET View	36
Gambar 13 <i>Flowchart</i> Pengolahan AERMOD View	38
Gambar 14 <i>Windrose</i> Tiap Semester	47
Gambar 15 Isopleth SO ₂ Semester II 2020	49
Gambar 16 Grafik antara Konsentrasi SO ₂ dan Jarak selama 24 jam Semester II 2020	50
Gambar 17 Grafik antara Konsentrasi SO ₂ dan Jarak selama 24 jam Semester I 2021	52
Gambar 18 Isopleth SO ₂ Semester II 2021	53
Gambar 19 Grafik antara Konsentrasi SO ₂ dan Jarak selama 24 jam Semester II 2021	55
Gambar 20 Isopleth SO ₂ Semester I 2022	55
Gambar 21 Grafik antara Konsentrasi SO ₂ dan Jarak selama 24 jam Semester I 2022	57
Gambar 22 Isopleth SO ₂ Semester II 2022	58
Gambar 23 Grafik antara Konsentrasi SO ₂ dan Jarak selama 24 jam Semester II 2022	60
Gambar 24 Isopleth SO ₂ Semester I 2023	60
Gambar 25 Grafik antara Konsentrasi SO ₂ dan Jarak selama 24 jam Semester I 2023	62
Gambar 26 Rekapitulasi Konsentrasi Tertinggi SO ₂ Tiap Semester	63
Gambar 27 Isopleth NO ₂ Semester II 2020	64
Gambar 28 Grafik antara Konsentrasi NO ₂ dan Jarak selama 24 jam Semester II 2020	65
Gambar 29 Isopleth NO ₂ Semester I 2021	66
Gambar 30 Grafik antara Konsentrasi NO ₂ dan Jarak selama 24 jam Semester I 2021	68
Gambar 31 Isopleth NO ₂ Semester II 2021	68
Gambar 32 Grafik antara Konsentrasi NO ₂ dan Jarak selama 24 jam Semester II 2021	70
Gambar 33 Isopleth NO ₂ Semester I 2022	71



Gambar 34 Grafik antara Konsentrasi NO ₂ dan Jarak selama 24 jam Semester I 2022.....	72
Gambar 35 Isopleth NO ₂ Semester II 2022.....	73
Gambar 36 Grafik antara Konsentrasi NO ₂ dan Jarak selama 24 jam Semester II 2022	74
Gambar 37 Isopleth NO ₂ Semester I 2023	75
Gambar 38 Grafik antara Konsentrasi NO ₂ dan Jarak selama 24 jam Semester I 2023.....	77
Gambar 39 Rekapitulasi Konsentrasi Tertinggi NO ₂ Tiap Semester.....	77
Gambar 40 Isopleth Partikulat Semester II 2020	78
Gambar 41 Grafik antara Konsentrasi Partikulat dan Jarak selama 24 jam Semester II 2020.....	80
Gambar 42 Isopleth Partikulat Semester I 2021	80
Gambar 43 Grafik antara Konsentrasi Partikulat dan Jarak selama 24 jam Semester I 2021	82
Gambar 44 Isopleth Partikulat Semester II 2021	83
Gambar 46 Grafik antara Konsentrasi Partikulat dan Jarak selama 24 jam Semester II 2021.....	84
Gambar 47 Isopleth Partikulat Semester I 2022	85
Gambar 48 Grafik antara Konsentrasi Partikulat dan Jarak selama 24 jam Semester I 2022.....	87
Gambar 49 Isopleth Partikulat Semester II 2022	87
Gambar 50 Grafik antara Konsentrasi Partikulat dan Jarak selama 24 jam Semester II 2022.....	89
Gambar 51 Isopleth Partikulat Semester I 2023	90
Gambar 52 Grafik antara Konsentrasi Partikulat dan Jarak selama 24 jam Semester I 2023	91
Gambar 53 Rekapitulasi Konsentrasi Tertinggi Partikulat Tiap Semester	92



DAFTAR TABEL

Tabel 1. Jenis-jenis Pencemar Udara	6
Tabel 2. Klasifikasi Stabilitas Atmosfer <i>Pasquill Gifford</i> pada Waktu Siang Hari	17
Tabel 3. Klasifikasi Stabilitas Atmosfer <i>Pasquill Gifford</i> pada Waktu Malam Hari	17
Tabel 4. Spesifikasi Cerobong	24
Tabel 5. Hasil Pengukuran Emisi Tiap Semester	42
Tabel 6. Hasil Perhitungan Laju Emisi Hot Oil A Tiap Semester	43
Tabel 7. Hasil Perhitungan Laju Emisi Hot Oil B Tiap Semester	43
Tabel 8. Hasil Perhitungan Laju Emisi TOX Tiap Semester	44
Tabel 9. Hasil Perhitungan Laju Emisi GTG A Tiap Semester	44
Tabel 10. Hasil Perhitungan Laju Emisi GTG B Tiap Semester	44
Tabel 11. Hasil Perhitungan Laju Emisi GTG C Tiap Semester	45
Tabel 12. Hasil Perhitungan Laju Emisi GTG D Tiap Semester	45
Tabel 13. Tabel Rekapitulasi Konsentrasi Maksimum Hasil Pemodelan	93
Tabel 14. Perhitungan Akurasi Hasil Model AERMOD SO ₂ di Semester I 2021 dengan Metode RMSE	94
Tabel 15. Perhitungan Akurasi Hasil Model AERMOD NO ₂ di Semester I 2021 dengan Metode RMSE	95
Tabel 16. Perhitungan Akurasi Hasil Model AERMOD Partikulat di Semester I 2021 dengan Metode RMSE	95
Tabel 17. Perhitungan Akurasi Hasil Model AERMOD SO ₂ di Semester I 2023 dengan Metode RMSE	96
Tabel 18. Perhitungan Akurasi Hasil Model AERMOD NO ₂ di Semester I 2023 dengan Metode RMSE	96



DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
SO ₂	Sulfur Dioksida
NO ₂	Nitrogen Dioksida
AGRU	<i>Acid Gas Removal Unit</i>
DHU	<i>Dehydration Unit</i>
BSRU	<i>Biological Sulfur Unit</i>
TOX	<i>Thermal Oxydation</i>
GTG A	<i>Gas Turbin Generator A</i>
GTG B	<i>Gas Turbin Generator B</i>
GTG C	<i>Gas Turbin Generator C</i>
GTG D	<i>Gas Turbin Generator D</i>
σ_y	Koefisien dispersi secara horizontal (m)
σ_z	Koefisien dispersi secara vertikal (m)
π	Konstanta Matematika (3,14)
He	Tinggi efektif stack (cerobong) di pusat kepulan (m)
Y	Jarak pengamatan sejajar dengan sumbu-y dari sumber emisi (m)
C	Konsentrasi polutan udara dalam massa per volume (mg/m ³)
Q	Laju emisi polutan dalam massa per waktu (mg/s)
U _s	Kecepatan angin di titik sumber (m/s)
E	Laju emisi (g/s)



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Meteorologi.....	104
Lampiran 2 Laporan Hasil Pengajuan.....	110
Lampiran 3 Pengolahan WRPLOT View	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 4 Pengolahan AERMET View	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 5 Pengolahan AERMOD View.....	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 6 Grafik antara Konsentrasi dan Jarak...	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 7 Dokumentasi Pengukuran.....	Error! Bookmark not defined.



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Yang Maha Esa, karena atas berkat dan karunia-Nya sehingga penyusun dapat menyusun dan menyelesaikan tugas akhir Laporan dengan judul “Analisis Sebaran Emisi Cerobong PT Pertamina EP Donggi Matindok Field Berbasis Model Dispersi *Gauss*”. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi dan meraih gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penyelesaian tugas akhir ini telah diusahakan semaksimal mungkin dan tentunya dengan bantuan serta bimbingan dari berbagai pihak secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis yaitu Bapak Nizar dan Ibu Rahmawaty beserta adik-adik saya Amel dan Reza yang telah memberikan doa dan dukungan kepada penulis dari awal hingga akhir perkuliahan.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Ibu Dr. Eng. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM. selaku Kepala Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan banyak waktu untuk memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis.hingga tugas akhir ini dapat diselesaikan.
4. Kak Zarah Arwienny Hanami, S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis hingga tugas akhir ini dapat diselesaikan.
5. Seluruh dosen, staf, dan karyawan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin terkhusus kepada Ibu Sumiati, Pak Olan dan Kak Tami sebagai staf S1 Teknik Lingkungan Universitas Hasanuddin yang telah membantu penulis selama



liahan.

an-teman seperjuangan Aermod Geng Danti dan Athallah yang telah bantu dan membersamai penulis hingga tugas akhir ini dapat diselesaikan.

7. Teman-teman dekat penulis Nisa dan Andini yang selalu memberi dukungan dan semangat kepada penulis.
8. Teman-teman PORTLAND 2020 yang telah kebersamai penulis selama masa perkuliahan.
9. Teman-teman Kabinet Rekonstruksi HMTL FT-UH yang telah membantu dan kebersamai penulis selama masa perkuliahan.
10. Teman-teman Teknik Lingkungan 2019 yang membantu dan mendukung penulis selama masa penelitian.
11. Semua pihak yang namanya yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terima banyak atas bantuan dan dukungan yang diberikan.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam tugas akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun dari pembaca sangat diharapkan demi penyempurnaan tugas akhir ini. Akhir kata, semoga laporan ini dapat memberikan ilmu dan manfaat terhadap pembaca.

Gowa, 20 Juli 2023

Penulis



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan industri yang pesat di Indonesia tidak hanya memberikan dampak positif bagi pendapatan negara dan kesejahteraan rakyat, tetapi juga memberikan dampak negatif bagi kesehatan. Hal ini disebabkan oleh potensi pencemaran lingkungan yang ditimbulkan oleh aktivitas industri tersebut, misalnya pencemaran udara yang berasal dari asap dan debu dari industri (Hasibuan et al., 2015).

Keberadaan industri migas berperan penting dalam penyediaan bahan bakar minyak (BBM) nasional. Aktivitas yang berlangsung dalam proses pengolahan minyak bumi menjadi BBM membutuhkan bahan bakar fosil yang pada akhirnya akan mengemisikan pencemar udara ke udara ambien. Udara ambien yang mengandung pencemar udara dapat berdampak negatif pada kesehatan manusia yang menghirupnya, misalnya iritasi mata, infeksi saluran pernafasan akut, dan kanker. Dampak yang ditimbulkan akan semakin besar mengingat target pemenuhan ketersediaan BBM Nasional yang terus meningkat dan berbanding lurus dengan peningkatan emisi akibat pengolahan migas (Agustini et al., 2014).

Berdasarkan hasil laporan pemantauan kegiatan industri migas yang dilakukan Kementerian Lingkungan Hidup tahun 2023, menunjukkan bahwa emisi SO_2 , NO_2 , dan Partikulat menjadi penyumbang terbesar emisi untuk industri migas. Hasil pendataan beban emisi dari industri migas untuk parameter Partikulat mencapai 158 ton/tahun, parameter SO_2 mencapai 1.121 ton/tahun, dan parameter NO_x mencapai 3.013 ton/tahun pada tahun 2023 (KLH, 2023). Hal ini mengindikasikan industri migas berpotensi menyebabkan penurunan kualitas udara ambien. Dampak tersebut dapat berakibat bagi masyarakat serta lingkungan di area sekitar industri, sehingga kualitas udara harus terus dilakukan pemantauan untuk memastikan udara ambien memenuhi baku mutu yang ditetapkan. Namun,



an kualitas udara yang dilakukan oleh suatu industri terbatas pada titik sampling saja karena memerlukan biaya yang besar, waktu yang lama yang besar, serta teknologi yang canggih. Oleh karenanya, sulit untuk

mengetahui konsentrasi pada titik reseptor lain di sekitar industri sehingga dibutuhkan suatu alternatif dalam upaya pemantauan kualitas udara yang efektif dan lebih representatif. Salah satu alternatif yang dapat digunakan dalam pemantauan kualitas udara adalah dengan menggunakan pemodelan kualitas udara dengan model dispersi *Gauss*.

Model dispersi *Gauss* merupakan bentuk persamaan matematika yang dapat dimasukkan ke dalam perhitungan variabel yang bersifat fisis dan diberikan informasi yang lebih detail mengenai sumber polutan pada suatu daerah yang diteliti. Menurut Anita (2011), sampai saat ini, Model dispersi Gaussian tetap dianggap paling tepat untuk melukiskan secara matematis pola 3 dimensi dari perjalanan semburan (*plume*) emisi. Dengan mengetahui konsentrasi dan pola penyebaran emisi, maka sebaran polutan dapat diprediksi guna memantau dan mengevaluasi polutan buangan yang berbahaya. Untuk membantu menyelesaikan persamaan Gaussian dan untuk membuat model sebaran dalam bentuk grafik, peneliti menggunakan *software AERMOD View*. AERMOD dapat digunakan untuk memprediksi konsentrasi maksimum polutan selama periode rata-rata 1 jam, 3 jam, 8 jam, 24 jam, bulanan, dan tahunan.

PT Pertamina EP Donggi Matindok Field dipilih sebagai tempat penelitian karena termasuk salah satu perusahaan yang kegiatan operasionalnya memproduksi *fuel gas* sehingga berpotensi menyumbangkan emisi SO_2 , NO_2 , dan Partikulat ke udara ambien. Berdasarkan latar belakang tersebut, maka penulis perlu melakukan penelitian dengan judul, “**Analisis Sebaran Emisi Cerobong PT Pertamina EP Donggi Matindok Field Berbasis Model Dispersi Gauss**”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan diantaranya sebagai berikut :

- 1) Bagaimana model sebaran emisi Sulfur Dioksida (SO_2), Nitrogen Dioksida (NO_2), dan Partikulat yang dihasilkan oleh PT Pertamina EP Donggi Matindok Field berdasarkan model AERMOD ?
 Bagaimana validasi model AERMOD jika dibandingkan dengan kondisi riil ?



1.3 Tujuan Penelitian

Dibawah ini merupakan tujuan dilakukannya penelitian ini antara lain sebagai berikut :

- 1) Menganalisis model sebaran Sulfur Dioksida (SO₂), Nitrogen Dioksida (NO₂), dan Partikulat yang dihasilkan oleh PT Pertamina EP Donggi Matindok Field berdasarkan model AERMOD.
- 2) Menganalisis validasi model AERMOD yang dibandingkan dengan kondisi eksisting.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Bagi Penulis
Sebagai pemenuhan syarat untuk menyelesaikan studi Strata 1 (S1) dan mendapatkan gelar Sarjana Teknik (ST) di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
- 2) Bagi Universitas
Dapat dijadikan sebagai tambahan arsip jumlah penelitian dan referensi bagi para peneliti selanjutnya, khususnya terkait Kualitas Udara.
- 3) Bagi Masyarakat
Menambah pengetahuan masyarakat tentang persebaran emisi cerobong dan dampaknya bagi kesehatan.

1.5 Ruang Lingkup

Pembatasan penelitian yang akan dilakukan meliputi :

- 1) Lokasi penelitian berada di PT. Pertamina EP Cepu Regional 4 Zona 13 Donggi Matindok Field, Kecamatan Batui, Kabupaten Banggai, Sulawesi Tengah.
- 2) Parameter yang ditinjau adalah Total Partikulat, Sulfur Dioksida (SO₂), dan Nitrogen Dioksida (NO₂).
- 3) Data emisi yang digunakan adalah data pada tahun 2020 – 2023.



- 4) Data meteorologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah data pada hari pengukuran emisi selama enam semester dari tahun 2020 – 2023.
- 5) Batasan jarak dispersi pada penelitian ini sejauh 2 km.
- 6) Penelitian ini menggunakan *software* AERMOD



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Udara

Udara adalah campuran gas yang ada di sekeliling bumi yang fungsinya sangat penting untuk kehidupan berbagai makhluk hidup, dimana komposisi udara seperti Oksigen (O_2) digunakan untuk bernafas, Karbondioksida (CO_2) berfungsi untuk proses fotosintesis oleh klorofil daun, dan Ozon (O_3) untuk menahan sinar ultraviolet dari matahari. Kandungan gas di udara normal terdiri dari 78% Nitrogen, 20% Oksigen, 0,93% Argon, 0,03% Karbondioksida, dan sisanya terdiri dari Neon, Helium, Metan dan Hidrogen (Saidal Siburian & Mar, 2020).

Udara dapat dibedakan menjadi dua yaitu udara ambien dan emisi. Udara ambien merupakan udara bebas di permukaan bumi yang terdapat pada lapisan troposfer dan berada dalam wilayah yuridiksi Republik Indonesia yang dibutuhkan dan dapat mempengaruhi kesehatan manusia, makhluk hidup, dan unsur lingkungan lainnya. Unsur-unsur berbahaya yang masuk ke dalam atmosfer dapat berupa Karbonmonoksida (CO), Nitrogendioksida (NO_2), Sulfurdioksida (SO_2), Hidrokarbon (HC), dan lain-lain. Sedangkan emisi adalah udara yang dikeluarkan oleh sumber emisi seperti knalpot kendaraan bermotor dan cerobong gas buang industri (Budi, 2023).

Berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021 udara sebagai sumber daya alam yang mempengaruhi kehidupan manusia serta makhluk hidup lainnya harus dijaga dan dipelihara kelestarian fungsinya untuk pemeliharaan kesehatan dan kesejahteraan manusia serta perlindungan bagi makhluk hidup lainnya. Agar udara dapat bermanfaat sebesar-besarnya bagi pelestarian lingkungan hidup, maka perlu dipelihara, dijaga dan dijamin mutunya melalui pengendalian pencemaran udara (Pemerintah Republik Indonesia, 2021)

2.2 Pencemaran Udara



Dasarkan PP No. 22 Tahun 2021 menyatakan bahwa pencemar udara adalah zat, energi, dan/atau komponen lainnya yang menyebabkan terjadinya pencemaran udara. Sedangkan pencemaran udara merupakan masuk atau

dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lainnya ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu udara ambien yang telah ditetapkan.

Definisi pencemaran udara merujuk kepada pendapat beberapa ahli, seperti menurut Corman (1999) pengertian pencemaran udara adalah kondisi dimana terdapat bahan kontaminan di atmosfer karena perbuatan manusia. Hal ini untuk membedakan dengan pencemaran udara alamiah dan pencemaran udara di tempat kerja. Sedangkan menurut Wisnu Arya yang dikutip oleh Utami (2005), pengertian pencemaran udara adalah campuran dari berbagai macam gas yang tidak tetap sehingga gas-gas tersebut mengganggu kehidupan. Dalam hal ini udara juga adalah atmosfer yang berada di sekeliling bumi yang fungsinya sangat penting bagi makhluk hidup. Menurut Mukono (2006), yang dimaksud pencemaran udara adalah bertambahnya bahan atau substrat fisik atau kimia ke dalam lingkungan udara normal yang mencapai sejumlah tertentu, sehingga dapat dideteksi oleh manusia serta dapat memberikan dampak buruk pada manusia, binatang, vegetasi dan material karena ulah manusia (*man made*) (Saidal Siburian & Mar, 2020).

2.2.1 Jenis Pencemar Udara

Pencemar udara (*air pollutant*) adalah zat yang berada di atmosfer dalam konsentrasi tertentu yang bersifat membahayakan manusia, binatang, tumbuhan atau benda-benda lain. Polutan yang berasal dari kegiatan manusia secara umum dibagi dalam dua kelompok besar yaitu polutan primer (mencakup 90% jumlah polutan udara seluruhnya) dan polutan sekunder. Polutan primer merupakan substansi pencemaran yang ditimbulkan langsung dari sumber pencemar udara. contoh: partikulat, NO_x, CO, SO₂, dll. Sedangkan polutan sekunder adalah pencemar yang terbentuk oleh interaksi kimiawi antara pencemar primer dan senyawa-senyawa penyusun atmosfer alamiah. Yang termasuk dalam polutan sekunder ini adalah ozon, Peroxy acyl Nitrat (PAN) dan Formaldehida (Corman dan Chambers dalam Mukono, 2008).

Tabel 1. Jenis-jenis Pencemar Udara

Pencemaran Udara	Jenisnya
Menurut bentuk	a. Gas b. Partikel



- | | | |
|----|--------------------|---|
| 2. | Menurut tempat | a. Ruangan (<i>indoor</i>)
b. Udara bebas (<i>outdoor</i>) |
| 3. | Gangguan kesehatan | a. Iritanisia
b. Anestesia
c. Toksis |
| 4. | Susunan kimia | a. Anorganik
b. Organik |
| 5. | Menurut asalnya | a. Primer
b. Sekunder |

Sumber: (Saidal Siburian & Mar, 2020).

2.2.2 Sumber Pencemaran Udara

Terdapat beberapa jenis komponen kegiatan yang dapat menjadi sumber emisi. Sumber utama polusi dapat dibagi lagi menjadi dua kelompok besar:

1. Sumber alamiah (*Natural Sources*)

Kegiatan alam yang dapat menyebabkan pencemaran udara antara lain kegiatan gunung berapi, kebakaran hutan, kegiatan mikroorganisme dan lain-lain. Polutan yang dihasilkan biasanya asap, gas dan debu (Budi, 2023).

2. Sumber Buatan Manusia (*Anthropogenic Sources*)

Kegiatan manusia yang menghasilkan bahan-bahan pencemar diantaranya adalah: pembakaran sampah, pembakaran pada kegiatan rumah tangga, industri, kendaraan bermotor, dan lain-lain. Bahan-bahan pencemar yang dihasilkan antara lain asap, debu, grit (pasir halus), dan gas (CO dan NO) (Budi, 2023).

Ada 7 (tujuh) jenis zat pencemar udara utama yang berasal dari kegiatan manusia (*anthropogenic sources*) sebagai berikut:

1. Karbon monoksida (CO)
2. Oksida Sulfur (SO_x)
3. Oksida Nitrogen (NO_x)
4. Hidrokarbon (HC)
5. Oksida fotokimia (O_x)
6. Ozon (O₃)
7. Timbal/Timah Hitam (Pb)

Sumber pencemar udara dapat dikelompokkan menjadi sumber bergerak dan tidak bergerak (Sarudji, 2010). Dalam proses pembakaran bahan bakar biasanya gas buang dari masing-masing kendaraan, yang diemisikan ke bieu sebagai pencemar. Hasil pembakaran tersebut diantaranya adalah CO,



CO₂, SO_x, NO_x, Hidrokarbon dan bahan dengan penambahan bahan aditif yang digunakan untuk menyempurnakan proses pembakaran. Dalam berbagai penelitian menunjukkan bahwa pada sepeda motor merupakan kendaraan yang berkontribusi besar dalam pencemaran CO, SO₂ dan Pb (Asya, 2019).

Menurut (Asya, 2019), yang termasuk sumber pencemar dari bahan bakar bersumber menetap adalah pembakaran beberapa jenis bahan bakar yang diemisikan pada suatu lokasi yang tetap. Bahan bakar tersebut terdiri atas batu bara, minyak bakar, gas alam, dan kayu destilasi minyak. Berbeda dengan sarana transportasi, sumber pencemar udara menetap mengemisikan polutan pada udara ambien tetap, sehingga dalam pengelolaan lingkungannya perlu perencanaan yang matang, misalnya harus dipertimbangkan keadaan geografi dan tofografi, metereologi, serta rencana tata ruang di wilayah tersebut. Contoh sumber pencemar tak bergerak seperti kegiatan industri, rumah tangga, dll.

2.3 Sulfur Dioksida (SO₂)

Sulfur dioksida merupakan senyawa kimia dengan rumus SO₂. Senyawa ini merupakan gas beracun dengan bau menyengat yang dikeluarkan oleh gunung berapi dan pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung unsur belerang seperti minyak, gas, dan batubara.

Sulfur dioksida (SO₂) memiliki karakteristik sebagai gas beracun, yaitu tidak berwarna, tidak mudah meledak dan tidak mudah terbakar, memiliki bau menyengat pada konsentrasi di atas 0,5 ppm sangat larut dalam air, dan menimbulkan rasa pada konsentrasi rendah. Belerang dioksida tidak berwarna dan berbau menyengat serta bereaksi dengan uap air di udara membentuk H₂SO₄, atau lebih sering disebut hujan asam, yang dapat merusak bahan, benda, dan tanaman.

Gas SO₂ telah lama dikenal sebagai gas yang dapat mengiritasi saluran pernapasan, seperti selaput lendir hidung, tenggorokan, dan saluran udara paru-paru. Efek kesehatan ini diperbesar pada penderita asma. Selain itu, SO₂ menjadi polutan sekunder di udara, seperti aerosol sulfat. Aerosol sulfat yang dihirup memiliki efek kesehatan yang lebih serius daripada partikel lain karena sifat dan karsinogeniknya. Karena gas SO₂ berpotensi menghasilkan aerosol sebagai polutan sekunder, peningkatan kematian akibat gagal napas, terutama



di antara orang tua dan anak-anak, sering dikaitkan dengan konsentrasi SO_2 dan partikel secara bersamaan (Putrakanto, 2021).

2.4 Nitrogen Dioksida (NO_2)

Nitrogen dioksida merupakan senyawa kimia dengan rumus NO_2 . Satu dari beberapa oksida nitrogen, NO_2 digunakan sebagai bahan sintesis untuk pembuatan asam nitrit, yang produksinya mencapai jutaan ton tiap tahunnya. Gas ini berwarna merah-kecoklatan dan merupakan gas beracun, baunya menyengat, dan merupakan salah satu polutan udara utama (Dewapandhu, 2021).

Pada dunia industri, NO_2 terbentuk dari hasil oksidasi NO yang terjadi pada proses Termal NO_x . Termal NO_x adalah proses pembentukan NO_x yang berasal dari kandungan nitrogen udara pembakaran. Nitrogen yang terkandung di dalam udara pembakaran dapat teroksidasi dan membentuk NO_x jika proses pembakaran terjadi pada temperatur yang cukup tinggi. Pada temperatur pembakaran 1204°C , molekul nitrogen (N_2) dan oksigen (O_2) akan terpecah menjadi atom-atom penyusunnya. Selanjutnya atom-atom N^{\cdot} dan O^{\cdot} akan bereaksi membentuk ikatan NO . Pada proses oksidasi lebih lanjut, senyawa NO ini akan menjadi NO_2 . NO_2 inilah yang biasanya tampak sebagai asap yang keluar dari cerobong asap (Sukarsono, 2004).

Bahaya yang dapat ditimbulkan akibat pencemaran NO_2 bagi lingkungan yaitu terjadinya hujan asam yang menurunkan tingkat kesuburan tanah dan mengancam kehidupan biota air. Adapun dampak pencemaran NO_2 terhadap manusia yaitu dapat menimbulkan iritasi paru-paru serta infeksi saluran pernafasan (Dewapandhu, 2021).

2.5 Partikulat

Partikulat dikelompokkan menjadi PM_{10} yaitu partikulat dengan ukuran $<10 \mu\text{m}$, $\text{PM}_{2,5}$ yaitu partikulat dengan ukuran $<2,5 \mu\text{m}$, dan TSP (*Total Suspended Particulate*) yaitu partikulat tersuspensi. Secara kimia partikel dapat okkan menjadi partikel anorganik dan *fly ash* (sisa debu dari sistem industri yang menggunakan bahan bakar fosil) (Wardoyo, 2016)

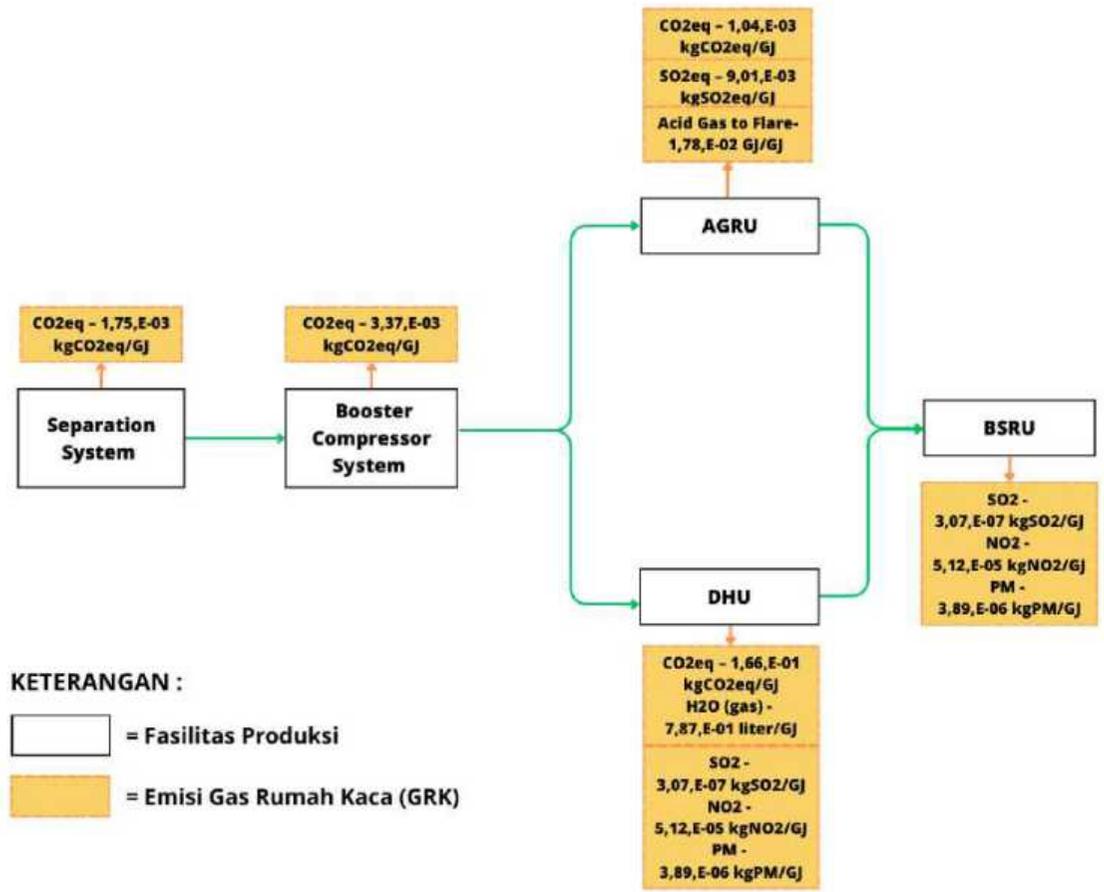


Sebagian benda partikulat yang keluar dari cerobong pabrik sebagai asap hitam tebal, tetapi yang paling berbahaya adalah partikel-partikel halus yang diduga mengandung bahan-bahan karsinogen, butiran-butiran yang begitu kecil sehingga dapat menembus bagian terdalam paru-paru dan terakumulasi. Sebagian besar partikel halus ini terbentuk dengan polutan lain, terutama sulfur dioksida dan nitrogen dioksida dan oksida nitrogen, yang secara kimiawi berubah dan membentuk zat-zat nitrat dan sulfat. Di beberapa kota, sampai separuh jumlah benda partikulat yang disebabkan oleh manusia terbentuk dari perubahan sulfur dioksida, menjadi partikel sulfat di atmosfer (Saidal Siburian & Mar, 2020).

2.6 Industri Minyak dan Gas

Kegiatan inti Pertamina EP berada di hulu migas dengan melakukan serangkaian kegiatan eksplorasi dan produksi migas. Eksplorasi adalah kegiatan mencari cadangan migas, sedangkan produksi merupakan rangkaian proses untuk mengangkat migas ke permukaan bumi. Eksplorasi meliputi studi geologi, studi geofisika, survei seismik, dan pengeboran. Kegiatan eksplorasi adalah tahap awal dari seluruh kegiatan usaha hulu migas. Kegiatan ini bertujuan mencari cadangan baru migas. Jika hasil eksplorasi menemukan cadangan migas yang cukup ekonomis untuk dikembangkan, kegiatan eksplorasi akan dilanjutkan dengan kegiatan produksi. Kegiatan usaha bidang energi migas memiliki potensi dalam menimbulkan pencemaran udara. Sisa pembakaran yang dikeluarkan di cerobong asap dapat berupa CO₂ (karbon dioksida), SO₂ (Sulfur dioksida), NO_x (nitrogen oksida), dan debu yang mengandung logam berat. Berikut skema emisi GRK yang dihasilkan pada proses produksi di PT Pertamina EP Donggi Matindok Field seperti pada Gambar 1.





Gambar 1 Skema Emisi GRK Proses Produksi PT Pertamina EP Donggi Matindok Field



Penjelasan pada Gambar 1 di atas adalah sebagai berikut.

- *Separation System*

Pada unit ini terjadi pemisahan HC menjadi kondensat, air dan gas. Input pada proses ini adalah fluida (mmscf) yang berasal dari Gas Well Head, serta terdapat penggunaan listrik (kWh). Output dari proses ini berupa gas HC (mmscf) yang menuju Unit *Booster Compressor*, dan *condensate* (barrel) yang menuju Unit *Condensate System*.

- *Booster Compressor*

Gas HC (mmscf) dari Unit *Separation System* akan diolah lebih lanjut ke unit AGRU melalui *Booster Compressor*. Terdapat penggunaan listrik (kWh) pada electric motor dan pada prosesnya menghasilkan emisi GRK ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{GJ}$).

- AGRU

Unit AGRU (*Acid Gas Removal Unit*) ini berfungsi untuk menghilangkan kandungan gas asam dan bahan baku gas HC (mmscf) dengan menggunakan bahan kimia *lean amine (sulfinol)* (barrel) dan *anti foam agent* (liter), serta terdapat input berupa air (liter) dan penggunaan energi listrik (kWh). Terdapat juga masukan dan keluaran dari proses ini adalah *rich amine* (barrel) dan *acid gas* ($\text{CO}_2+\text{H}_2\text{S}$) (mmscf). Karena adanya penggunaan listrik maka ditimbulkan juga emisi GRK ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{GJ}$) dan SO_2 (kg).

- DHU

Dehydration Unit (DHU) berfungsi untuk menghilangkan kandungan air pada treated gas. Masukan yang digunakan sebagai bahan baku pada unit ini yaitu treated gas (mmscf), *triethylene glycol* (liter), dan H_2O pada DHU (liter). Diperlukan juga masukan energi listrik (kWh) dan bahan bakar berupa *LP fuel gas* (mmscf). Keluaran dari unit ini adalah treated gas (mmscf), emisi GRK ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{GJ}$), emisi SO_2 (kg), NO_2 (kg), serta PM (kg).

- BSRU

Pada Unit BSRU (*Biological Sulfur Unit*) ini acid gas (mmscf) akan dirubah menjadi *biosulfur cake*. Di dalam prosesnya dibutuhkan beberapa masukan air (m), air (liter) dan energi listrik (kWh). Keluaran dari proses ini adalah *solution gas* (H_2S) (mmscf), *biosulphur slurry* (kg), *bleed water* (m), konvensional SO_2 (kg), dan NO_2 (kg), serta partikulat (kg).



2.7 Dispersi Polutan

Dispersi merupakan proses perpindahan, difusi, reaksi kimia dan pengangkutan polutan yang telah diemisikan ke udara oleh atmosfer. Beberapa penelitian terkait dispersi pencemar udara, menunjukkan bahwa akan ada beberapa lokasi di sekitar sumber pencemar yang beresiko terpapar pencemar dalam konsentrasi tertentu (Rizqi, 2021). Walaupun konsentrasi tersebut berfluktuasi, tetapi jika arah angin dominan menuju ke wilayah tersebut, akan terjadi akumulasi pencemar, sehingga berpotensi melampaui baku mutu udara ambien, dan resiko keterpaparan dalam waktu lama akan mengancam kesehatan masyarakat di sekitar lokasi tersebut. Fluktuasi konsentrasi maksimum harus dipertimbangkan sebagai faktor penting dalam menentukan resiko keterpaparan, karena potensi dampak zat berbahaya serta respon toksisitas akut oleh pajanan jangka pendek ditentukan oleh konsentrasi maksimum.

Kondisi meteorologi setempat yang mempengaruhi proses dispersi polutan akan dijelaskan lebih lanjut dibawah ini:

2.7.1 Kecepatan dan arah angin

Angin merupakan faktor utama dalam persebaran zat pencemar udara. Angin dapat mengakibatkan suatu zat berpindah tempat. Kecepatan angin adalah jarak yang ditempuh oleh angin per satuan waktu. Kecepatan angin dinyatakan dalam knot, km/jam dan m/s. Dalam klimatologi kecepatan angin adalah kecepatan udara yang bergerak secara horizontal pada ketinggian dua meter di atas tanah. Kecepatan angin dipengaruhi oleh tekanan udara dan asal dari arah kecepatan angin tersebut sebagai faktor pendorong. Kecepatan angin dapat digunakan dalam menentukan jangkauan daerah penerima. Kecepatan angin yang lebih tinggi pada suatu tempat dekat pembuangan polutan udara lebih cepat membawa polutan tersebut jauh dari sumbernya, sebaliknya bila kecepatan angin yang rendah akan menyebabkan terkonsentrasinya polutan di sekitar sumber pencemaran dan dapat berlangsung lebih lama pada daerah yang bersangkutan. Sedangkan arah angin dapat digunakan kan daerah penerima dispersi zat (Putra, 2020).



2.7.2 Radiasi Matahari

Radiasi matahari yang jatuh ke bumi ini disebut insolasi. Hampir 99 % energi radiasi matahari berada di daerah gelombang pendek, yaitu antara 0,15 μm dan 4,0 μm , sehingga radiasi matahari dinamakan pula radiasi gelombang pendek. Radiasi matahari yang sampai di atmosfer maupun yang tiba di permukaan bumi merupakan energi utama dalam siklus cuaca termasuk persebaran polutan di atmosfer. Pengaruh dari radiasi matahari secara fisik dan dinamik dalam penyebaran polusi udara adalah sebagai sumber energi perpindahan massa udara. Hal ini disebabkan perbedaan pemanasan di permukaan bumi maupun di perairan yang menimbulkan angin dan turbulensi, sehingga mempengaruhi kondisi stabilitas atmosfer dan pencampuran polutan dengan lingkungan sekitar (Poudyal et al., 2011)

2.7.3 Suhu Udara

Keadaan suhu udara di permukaan bumi ditentukan oleh faktor penyinaran matahari, kemiringan sinar matahari, keadaan permukaan bumi dan awan. Penyinaran matahari akan memberikan panas udara di permukaan bumi. Suhu udara yang sampai di permukaan bumi tidak merata disebabkan oleh penyebaran sinar matahari yang tidak rata. Hasil penelitian terdahulu diketahui bahwa suhu udara dan konsentrasi SO_2 memiliki hubungan yang berbanding lurus yaitu semakin tinggi suhu udara maka konsentrasi SO_2 juga semakin tinggi. Hal ini terjadi dikarenakan suhu yang tinggi akan mempercepat terjadinya penguraian gas yang berdampak terhadap tingginya konsentrasi gas SO_2 (Istantinova, 2013).

2.7.4 Tutupan Awan dan Tinggi Awan Rendah (*Ceiling Height*)

Tutupan awan (*cloud cover*) mempunyai pengaruh besar terhadap suhu. Umumnya, keberadaan awan akan menghalau banyak energi matahari untuk mencapai permukaan bumi sehingga mengakibatkan suhu udara menurun (Sasmita et al., 2019). Tutupan awan memiliki pengaruh terhadap konsentrasi polutan di udara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada periode musim panas, tutupan



polusi positif dengan peningkatan konsentrasi PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, SO_2 , CO_2 , (Lui et al., 2018).

Tinggi awan rendah (*ceiling height*) diartikan sebagai tinggi dasar lapisan awan terendah ketika mendung. Pada skala antar tahun, tinggi awan rendah berkorelasi positif dengan suhu permukaan di semua musim kecuali musim dingin. Dalam pemodelan sebaran dengan model ICST3 dibutuhkan data tinggi awan rendah untuk menghitung stabilitas atmosfer. Secara khusus, ketinggian tutupan awan mempengaruhi keseimbangan panas di permukaan bumi (USEPA, 2005).

2.7.5 Kelembaban Relatif

Suhu dan kelembaban relatif memainkan peran penting dalam pencampuran vertikal polutan di atmosfer dan perubahan kondisi stabilitas atmosfer. Penelitian terdahulu yang dilakukan di Addis Ababa, Egypt menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi dari polutan NO_x bergantung pada kelembaban relatif yang dibuktikan selama musim hujan menyebabkan konsentrasi NO_x meningkat dua kali lipat (Fikeraddis & Endeshaw, 2020).

2.7.6 Tekanan Udara

Udara yang mengembang menghasilkan tekanan udara yang lebih rendah dan udara yang berat menghasilkan tekanan lebih tinggi. Tekanan udara disebut juga sebagai tekanan atmosfer bumi yang berubah terhadap ketinggian dan cuaca. Nilai atau angka dari tekanan udara merupakan bagian dari karakteristik udara yang dapat digunakan untuk meramalkan cuaca di suatu wilayah (Yulkifli et al., 2016). Penelitian terdahulu di China menunjukkan bahwa terdapat hubungan antara tekanan udara terhadap konsentrasi NO₂, CO, PM₁₀ yang berarti semakin tinggi tekanan udara maka semakin rendah peningkatan laju konveksi udara yang tidak kondusif untuk difusi pencemar (Zeng & Zhang, 2017).

2.7.7 Stabilitas Atmosfer

Stabilitas atmosfer berkaitan dengan pergerakan udara secara vertikal. Pergerakan vertikal udara dipengaruhi oleh suhu dan tekanan atmosfer. Akibat dari adanya pergerakan vertikal udara akan menyebabkan terjadinya konveksi atau pergerakan vertikal udara. Pemanasan bumi yang berbeda mempengaruhi udara langsung di atas permukaan yang dipanaskan akan ikut menjadi panas berpindah ke area yang lebih sedikit panasnya. Pemanasan ini



terjadi karena 2 prinsip, yaitu konduksi dan konveksi. Konduksi adalah perpindahan panas yang terjadi ketika sesuatu menyentuh permukaan yang dipanaskan. Sedangkan konveksi adalah pencampuran vertikal udara (Franek & DeRose, 2003).

Udara beredar di bumi dalam gerakan 3 dimensi, tidak hanya bergerak secara horizontal dan vertikal tetapi juga turbulensi. Turbulensi terjadi dari 2 proses yaitu turbulensi mekanis dan turbulensi termal. Turbulensi termal dihasilkan dari pemanasan atmosfer dan turbulensi mekanis dari pergerakan udara yang melewati penghalang. Kedua turbulensi tersebut terjadi selama pergerakan udara atmosfer. Turbulensi termal dominan terjadi saat hari cerah dengan angin sepoi-sepoi dan turbulensi mekanik terjadi malam hari dengan keadaan berangin dengan stabilitas atmosfer netral (Franek & DeRose, 2003).

Apabila tidak terjadi turbulensi, maka stabilitas atmosfer dapat meningkatkan proses dispersi polutan. Akan tetapi, ketika turbulensi mekanis terjadi maka dapat menekan aliran udara ke bawah dari sumber polusi yang dapat mengakibatkan konsentrasi polutan menjadi tinggi karena langsung melawan arah angin (Franek & DeRose, 2003). Stabilitas atmosfer diklasifikasikan menjadi 3 (stabil, tidak stabil, netral). Penjelasan stabilitas atmosfer adalah sebagai berikut.

1) Atmosfer Stabil

Kondisi ini sangat tahan terhadap perubahan. Apabila terdapat pengaruh dari topografi atau konvergensi yang mendorong udara ke atas, suhu udara yang naik relatif terhadap lingkungan sehingga udara akan lebih memilih kembali ke posisi semula. Secara singkat, ketika parcel udara sedang didorong ke atas, ia akan memiliki daya apung negatif yang berarti akan kembali ke posisi semula karena memiliki keseimbangan dengan lingkungan. Sebaliknya, ketika parcel udara didorong ke bawah, maka udara akan memiliki daya apung positif sehingga memiliki kemampuan untuk naik ke atas.

2) Atmosfer Tidak Stabil

Pada lapisan atmosfer yang tidak stabil, lapse rate dari parcel udara akan lebih kecil dibandingkan dengan lapse rate yang berada di lingkungan. Meskipun udara mendingin saat naik, tapi suhunya akan tetap dalam keadaan hangat daripada udara di sekitarnya. Hal ini dikarenakan parcel udara



lebih hangat dari lingkungan, sehingga memiliki kemampuan untuk naik dengan sendirinya.

3) Atmosfer Netral

Ketika atmosfer netral, lapse rate dari parcel udara dan lingkungan sekitar adalah sama. Jika parcel udara terangkat di lapisan atmosfer netral, maka suhu dan tekanan parcel udara akan sama dengan suhu dan tekanan di sekitarnya di setiap ketinggian dengan keadaan setimbang dengan lingkungan.

Dengan mengetahui stabilitas atmosfer (stabil, tidak stabil, netral) maka dapat diketahui kecenderungan emisi polutan menyebar dan seperti apa pola konsentrasi di permukaan tanah pada waktu tertentu. Selain dapat digunakan untuk memprediksi pengangkutan dan penyebaran polutan berdasarkan arah angin, dengan stabilitas atmosfer dapat diprediksi kapan kondisi stabilitas yang mungkin terjadi dan seberapa lama polutan akan bertahan di atmosfer. Klasifikasi stabilitas atmosfer di siang hari dan malam hari terdapat pada Tabel 2 dan Tabel 3 sebagai berikut.

Tabel 2. Klasifikasi Stabilitas Atmosfer *Pasquill Gifford* pada Waktu Siang Hari

Kecepatan Angin (m/s)	Radiasi Matahari (W/m ²)			
	≥ 925	925-675	675-175	< 175
< 2	A	A	B	D
2-3	A	B	C	D
3-5	B	B	C	D
5-6	C	C	D	D
≥ 6	C	D	D	D

Sumber : USEPA (2000)

Tabel 3. Klasifikasi Stabilitas Atmosfer *Pasquill Gifford* pada Waktu Malam Hari

Kecepatan Angin (m/s)	Gradien Suhu Vertikal	
	< 0	≥ 0
< 2	E	F
2,0 – 2,5	D	E
≥ 2,5	D	D

Sumber : USEPA (2000)

Keterangan :

A = Sangat tidak stabil



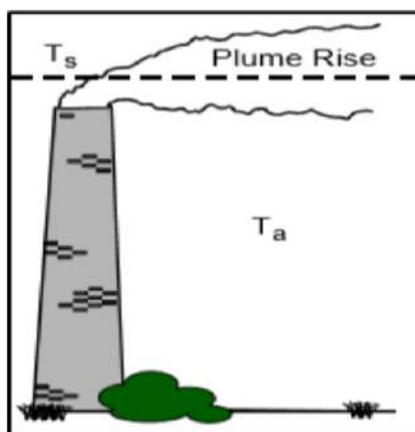
ik stabil

E = Agak sedikit stabil

F = Stabil

2.7.8 *Plume Rise*

Plume rise adalah tinggi keputan asap gas buang (polutan) ketika meninggalkan cerobong (Arif et al., 2020). Tinggi keputan asap dihitung sebagai jarak ke garis tengah imajiner. Kenaikan keputan asap (H) bergantung pada karakteristik fisik cerobong. Perbedaan suhu antara gas cerobong (T_s) dan udara sekitar (T_a) menentukan densitas keputan yang mempengaruhi kenaikan keputan asap. Sehingga asap dari cerobong yang pendek bisa naik setinggi asap dari cerobong yang lebih tinggi. *Plume rise* ditunjukkan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2 *Plume Rise*

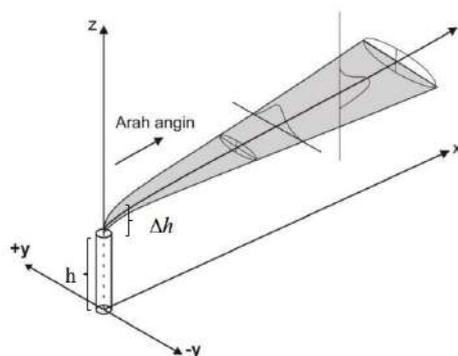
Karakteristik dari keputan asap digunakan untuk menentukan momentum dan karakteristik gas buang digunakan untuk menentukan kemampuan gas buang untuk bertahan/mengambang di udara (*buoyancy*). Saat momentum membawa gas buang keluar cerobong, maka kondisi atmosfer mulai mempengaruhi keputan. Pada atmosfer tidak stabil, daya apung (*buoyancy*) dari *plume* akan meningkat saat naik dan meningkatkan ketinggian plume sedangkan pada atmosfer yang stabil, daya apung plume akan berkurang saat naik. Selain itu, pada atmosfer netral daya apung plume tetap konstan (Ilaboya et al., 2011).



2.8 Model Dispersi Gauss

Gaussian dianggap paling tepat untuk melukiskan secara matematis konsentrasi dari perjalanan semburan (*plume*) emisi. Menurut (Nauli, 2002)

dalam (Asis, 2022), menjelaskan bahwa model dispersi Gauss dapat menyatakan secara sederhana penyimpangan partikel di udara terhadap waktu. Model dispersi Gauss menyatakan penyebaran konsentrasi plume ke arah horizontal dan vertikal dihitung berdasarkan distribusi normal. Untuk polutan yang tidak bereaksi, massa polutan yang terkandung dalam setiap jarak akan sama harganya. Akan tetapi kadarnya akan berkurang sesuai dengan bertambahnya jarak, karena turbulensi atmosfer cenderung menyebarkan material ke arah horizontal dan vertikal. Kadar rata-rata polutan pada suatu titik akan berbanding terbalik terhadap lebar sebaran dan kecepatan angin. Dalam sistem koordinasi estimasi dispersi atmosfer untuk koordinat x dianggap sebagai arah horizontal sepanjang arah angin. Koordinat y merupakan bidang horizontal dan tegak lurus terhadap koordinat x sedangkan z sama seperti koordinat y tetapi ke arah vertikal. Plume bergerak sepanjang atau sejajar dengan koordinat x. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.



Berdasarkan Gambar 3 diatas dapat dirumuskan sebuah persamaan yakni sebagai berikut.

Gambar 3 Estimasi Dispersi di Atmosfer

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi Us\sigma_y\sigma_z} \exp - \frac{1}{2} \left[\frac{y}{\sigma_y} \right]^2 \exp - \frac{1}{2} \frac{z-He^2}{\sigma_z} + \exp - \frac{1}{2} \frac{z+He^2}{\sigma_z} \tag{1}$$

Dimana :

C = Konsentrasi polutan udara dalam massa per volume (mg/m³)

Q = Laju emisi polutan dalam massa per waktu (mg/s)

Us = Kecepatan angin di titik sumber (m/s)



σ_y dispersi secara horizontal (m)

σ_z dispersi secara vertikal (m)

He = parameter matematika (3,14)

H_e = Tinggi efektif stack (cerobong) di pusat kepulan (m)

Y = Jarak pengamatan sejajar dengan sumbu-y dari sumber emisi (m)

Model dispersi Gauss memiliki keterbatasan dalam pengaplikasiannya.

Berikut keterbatasan model dispersi Gauss, yakni :

- Hasil model berupa garis lurus (seperti sinar senter), padahal dispersi sebenarnya mungkin mempunyai pola yang tidak lurus
- Model dispersi Gauss bekerja baik (akurasi tinggi) di daerah datar maupun kurang bekerja baik di daerah pegunungan dengan terrain yang kompleks
- Model dispersi Gauss bekerja baik pada kecepatan angin tinggi tapi kurang bekerja baik pada *calm wind* (angin kecepatan sangat rendah < 1 m/s)
- Model dispersi Gauss bekerja kurang baik (akurasi rendah) di daerah yang mengalami konveksi (aliran massa udara vertikal), karena model dispersi Gauss beramsusi kondisi atmosfer adalah seragam (tanpa konveksi)

2.9 AERMOD

AERMOD merupakan model penyebaran dengan pendekatan Gaussian yang dikembangkan oleh AERMIC (*American Meteorological Society* {AMS}/ *United States Environmental Protection Agency* {EPA} *Regulatory Model Improvement Committee*). AERMOD merupakan sistem permodelan dispersi atmosferik yang terdiri dari tiga modul yang terintegrasi yaitu model dispersi untuk kondisi tunak, pra pengolah data meteorologi dan pra pengolah data permukaan bumi. AERMOD menggunakan pendekatan Gaussian dan bi-Gaussian dalam model dispersinya, yang menghasilkan konsentrasi polutan di udara ambien dalam periode harian, bulanan maupun tahunan. AERMOD dapat digunakan untuk area perkotaan dan pedesaan, permukaan bumi yang rata atau berelevasi, emisi gas yang dikeluarkan oleh banyak sumber (termasuk sumber titik, area atau volume).

AERMOD merupakan model gaussian jangka pendek (kurang dari 50 km) untuk mensimulasikan penyebaran emisi cerobong dari aktivitas industri. Model ini telah dikalibrasi dan diadopsi oleh US EPA sejak tahun 2005 untuk menggantikan



ERMOD menggunakan teori similaritas *Planetary Boundary Layer* memperhitungkan dispersi yang dipengaruhi oleh pemanasan & gesekan. Model ini membutuhkan informasi permukaan berupa

panjang kekasaran, kelembaban, dan reflektifitas. Selain itu, informasi atmosfer atas yang lengkap diperlukan untuk menentukan kedalaman lapisan pencampuran (*mixing height*), dan membangun penetrasi *plume* parsial sepanjang bagian atas lapisan pencampuran (Assegaf dan Jayadipraja, 2015 dalam Asis, 2022).

Menurut Cimorelli et al., (2005) model AERMOD terdiri dari model utama atau AERMOD, prosesor meteorologi (AERMET), dan prosesor geomorfologi (AERMAP). AERMET digunakan untuk menyediakan data meteorologi seperti kecepatan angin, arah angin, suhu, tutupan awan. Selain itu, AERMET juga menyajikan data permukaan seperti *albedo*, *bowen ratio*, dan *surface roughness*. Semua data tersebut diproses oleh AERMET untuk menghitung parameter permukaan. Parameter meteorologi yang diinputkan (masukan) yaitu jumlah curah hujan, tutupan awan, tekanan, tekanan permukaan laut sebagai parameter permukaan, suhu titik embun, arah angin, dan kelembaban relatif. Pra-prosesor AERMAP berfungsi untuk menganalisis informasi topografi regional yang hasilnya digunakan sebagai informasi pelengkap mengenai sumber difusi dan jaringan. AERMAP digunakan untuk memproses terrain data dalam hubungannya dengan tata letak reseptor dan sumber emisi yang akan digunakan sebagai file kontrol AERMOD.

Untuk menjalankan AERMOD View membutuhkan data laju emisi. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 Tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara di Daerah, terdapat dua cara menghitung laju emisi dari suatu sumber yaitu dengan data aktual C dan Q dari hasil pemantauan dan dengan nilai FE dan informasi mengenai aktivitas yang mengemisikan. Pada penelitian ini digunakan rumus data aktual C dan Q, sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$E = C \times A \times Q \times (\text{konversi mg ke g})$$

$$E = \frac{C \times A \times Q}{1000} \quad (2)$$

Dimana :

E = laju emisi (g/s)



ng keluar dari stack (m/s)

ran stack (m²)

i polutan yang keluar dari stack (mg/m³)