



JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Analisis Risiko Kesehatan Paparan SO₂ dari Emisi Insinerator di TPS3R Randu Alas Menggunakan Pendekatan Model Dispersi AERMOD

Hamel Farid
22513042

Dosen Pembimbing I:
Adam Rus Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.

Dosen Pembimbing II:
Ana Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia
2026



DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Health Risk Assessment of SO₂ Exposure from Incinerator Emissions at the Randu Alas TPS3R Using an AERMOD Dispersion Approach

Hamel Farid

22513042

Supervisor I:

Adam Rus Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.

Supervisor II:

Ana Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.

Environmental Engineering Bachelor Program

Faculty of Civil Engineering and Planning

Universitas Islam Indonesia

2026

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

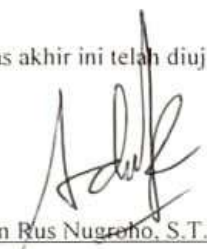
Analisis Risiko Kesehatan Paparan SO₂ dari Emisi Insinerator di TPS3R Randu Alas Menggunakan Pendekatan Model Dispersi AERMOD

Tugas akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Hamel Farid

22513042

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 08 Mei 2026 dan disetujui oleh:


Adam Rus Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.

(Pembimbing 1)


Ana Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.

(Pembimbing 2)


Supriyanto, S.T., M.Sc., M.Eng., Ph.D.

(Penguji)

Mengetahui,

Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana


Ayu Juliani, S.T., M.Sc. (Res. Eng.), Ph.D.



PERNYATAAN

Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia, maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini merupakan gagasan, rumusan, dan studi saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan dosen pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Perangkat lunak atau program komputer yang digunakan dalam tugas akhir ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya. Bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Tidak ada penggunaan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI) dalam penyusunan karya tugas akhir ini kecuali:
 - a. untuk membantu dalam kadar yang wajar (seperti membantu mengoreksi, mencari ide, dan mencari referensi), dan
 - b. tercantum dan dijelaskan perihal penggunaannya secara eksplisit di dalam karya tugas akhir ini.Implikasi dari penggunaan AI tersebut menjadi tanggung jawab saya sepenuhnya.
6. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 08 Mei 2026

Yang membuat pernyataan,



Hamel Farid

22513042

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Risiko Kesehatan Paparan SO₂ dari Emisi Insinerator di TPS3R Randu Alas Menggunakan Pendekatan Model Dispersi AERMOD” dapat diselesaikan dengan baik. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana pada Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia.

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari dukungan, bantuan, dan bimbingan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga atas doa, dukungan, serta motivasi yang diberikan.
2. Bapak/Ibu dosen pembimbing atas arahan, masukan, dan bimbingan selama penelitian dan penyusunan laporan.
3. Seluruh dosen Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia atas ilmu dan pengalaman yang diberikan selama masa perkuliahan.
4. Pengelola TPS3R Randu Alas serta masyarakat sekitar yang telah membantu dan bersedia menjadi responden penelitian. T
5. eman-teman serta semua pihak yang telah memberikan dukungan selama penyelesaian Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk perbaikan di masa mendatang. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang pengelolaan lingkungan.

Sleman, 24 Maret 2026

Hamel Farid

Analisis Risiko Kesehatan Paparan SO₂ dari Emisi Insinerator di TPS3R Randu Alas Menggunakan Pendekatan Model Dispersi AERMOD

Mahasiswa : Hamel Farid
NIM : 22513042
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing I : Adam Rus Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.
Pembimbing II : Ana Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.

Abstrak

TPS3R Randu Alas menggunakan insinerator sebagai metode pengolahan residu sampah rumah tangga yang berpotensi menghasilkan emisi sulfur dioksida (SO₂). Penelitian ini bertujuan menganalisis konsentrasi SO₂ udara ambien, mengevaluasi emisi cerobong, memodelkan dispersi SO₂ menggunakan AERMOD, melakukan validasi model, serta menganalisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL). Pengukuran udara ambien dilakukan pada lima titik reseptor dan pengukuran emisi menggunakan *gas analyzer* Testo 350. Pemodelan dilakukan menggunakan AERMOD dengan data meteorologi tahun 2025 dan divalidasi menggunakan data lapangan sebelum digunakan dalam ARKL terhadap 38 responden menggunakan pendekatan *Risk Quotient* (RQ).

Hasil pengukuran menunjukkan konsentrasi SO₂ udara ambien berada pada rentang 52,70-89,67 µg/m³ dan masih di bawah baku mutu 150 µg/m³. Namun, konsentrasi SO₂ emisi terkoreksi sebesar 383,21 mg/Nm³ melebihi baku mutu emisi 210 mg/Nm³. Hasil pemodelan menunjukkan konsentrasi maksimum periode 1 jam mencapai 185,7 µg/m³, sedangkan periode 24 jam sebesar 71,3 µg/m³. Hasil validasi 6 parameter menunjukkan model AERMOD memiliki kesesuaian yang baik terhadap kondisi lapangan sehingga representatif digunakan dalam ARKL. Hasil ARKL menunjukkan mayoritas masyarakat masih berada pada kategori aman (RQ < 1), namun kelompok anak-anak memiliki nilai RQ tertinggi sebesar 0,958 sehingga menjadi kelompok paling rentan terhadap paparan SO₂.

Kata kunci: sulfur dioksida (SO₂), insinerator, AERMOD, analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL), validasi model, TPS3R Randu Alas.

Health Risk Assessment of SO₂ Exposure from Incinerator Emissions at Randu Alas TPS3R Using the AERMOD Dispersion Model

Student : Hamel Farid
Student Number : 22513042
Study Program : Environmental Engineering - Bachelor Program
Supervisor I : Adam Rus Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.
Supervisor II : Ana Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.

Abstract

TPS3R Randu Alas utilizes an incinerator as a household residual waste treatment method that potentially generates sulfur dioxide (SO₂) emissions. This study aimed to analyze ambient SO₂ concentrations, evaluate stack emissions, model SO₂ dispersion using AERMOD, validate the model, and assess environmental health risks. Ambient air measurements were conducted at five receptor points, while stack emissions were measured using a Testo 350 gas analyzer. Dispersion modeling was performed using AERMOD with 2025 meteorological data and validated using field observation data before being applied in Environmental Health Risk Assessment (EHRA) involving 38 respondents using the Risk Quotient (RQ) approach.

The results showed that ambient SO₂ concentrations ranged from 52.70-89.67 µg/m³ and remained below the ambient air quality standard of 150 µg/m³. However, the corrected SO₂ stack emission concentration reached 383.21 mg/Nm³, exceeding the emission standard of 210 mg/Nm³. Dispersion modeling indicated that the maximum 1-hour concentration reached 185.7 µg/m³, while the maximum 24-hour concentration was 71.3 µg/m³. The validation results based on 6 evaluation parameters demonstrated good agreement between the AERMOD model and field observations, indicating its suitability for EHRA analysis. The EHRA results indicated that most residents were still within the acceptable risk category (RQ < 1), although children had the highest RQ value of 0.958 and were identified as the most vulnerable group to SO₂ exposure.

Key words: sulfur dioxide (SO₂), incinerator, AERMOD, environmental health risk assessment (EHRA), model validation, TPS3R Randu Alas.

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
Abstrak.....	ii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	4
1.5. Ruang Lingkup	4
1.6. Kerangka Berpikir	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. TPS3R Randu Alas dan Wilayah Studi	7
2.2. Kualitas Udara Ambien dan Pencemaran Udara	9
2.2.1 Pengertian dan Komposisi Udara Ambien	9
2.2.2 Jenis dan Sumber Pencemar Udara	10
2.2.3 Dampak Pencemaran Udara terhadap Kesehatan dan Lingkungan	11
2.2.4 Standar Acuan dan Baku Mutu Udara Ambien Nasional.....	12
2.3. Sulfur Dioksida (SO ₂).....	13
2.3.1 Karakteristik Fisik dan Kimia SO ₂	13
2.3.2 Sumber Emisi SO ₂ (Alami dan Antropogenik)	14
2.3.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Dispersi SO ₂	15
2.3.4 Dampak Paparan SO ₂ terhadap Kesehatan dan Lingkungan	16
2.4. Emisi SO ₂ dari Proses Insinerasi Sampah	17
2.5. Pemodelan Dispersi Polutan Udara	19
2.5.1 Konsep dan Prinsip Pemodelan Dispersi	19

2.5.2	Jenis Model Dispersi (Gaussian, Lagrangian, Eulerian).....	20
2.5.3	Persamaan-persamaan Pemodelan	22
2.6.	Model AERMOD.....	26
2.6.1	Struktur dan Komponen Model.....	26
2.6.2	Parameter Input dan Output Model.....	28
2.6.3	Studi Terdahulu Penggunaan AERMOD untuk SO ₂	29
2.7.	Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Akibat Paparan SO ₂	30
2.7.1	Konsep dan Tahapan Analisis Risiko	30
2.7.2	Penilaian Risiko Non-Karsinogenik (RfC, Intake, RQ).....	31
2.8.	Studi Penelitian Terdahulu.....	32
BAB III METODE PENELITIAN		37
3.1.	Diagram Alir Penelitian	37
3.2.	Lokasi dan Waktu Penelitian	38
3.2.1	Lokasi Penelitian	38
3.2.2	Waktu Penelitian	42
3.3.	Pengumpulan Data.....	43
3.3.1	Jenis dan Sumber Data	43
3.3.2	Pengambilan Data Sampel	44
3.3.3	Pengujian Laboratorium.....	45
3.4.	Analisis Data	46
3.4.1	Perhitungan Konsentrasi SO ₂ Hasil Pengujian	46
3.4.2	Pemodelan Dispersi Menggunakan AERMOD.....	47
3.4.3	Uji Validasi Model	48
3.4.4	Metode Penentuan Jumlah dan Karakteristik Responden....	50
3.4.5	Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan	51
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		54
4.1.	Gambaran Umum Lokasi Penelitian dan Potensi Paparan	54
4.2.	Hasil Pengukuran Konsentrasi SO ₂ di Udara Ambien.....	55
4.3.	Hasil Uji Emisi SO ₂ dan Karakteristik Sumber Emisi	57
4.4.	Pemodelan Dispersi SO ₂ dan Analisis Pola Sebaran	61
4.5.	Validasi Kinerja Model Dispersi AERMOD	65

4.6. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL)	67
4.7. Implikasi Risiko terhadap Kesehatan Masyarakat dan Keterbatasan Penelitian	71
BAB V PENUTUP	76
5.1. Kesimpulan.....	76
5.2. Saran.	77
DAFTAR PUSTAKA	79
LAMPIRAN	89
RIWAYAT HIDUP	107

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Literatur Penelitian Terdahulu.....	33
Tabel 3.1 Lokasi Titik Sampling	40
Tabel 3.2 Jenis Data Yang Digunakan	43
Tabel 3.3 Komponen Utama Model Yang Digunakan	47
Tabel 3.4 Parameter Yang Digunakan Dalam Pemodelan AERMOD	47
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Konsentrasi SO ₂ pada Udara Ambien di Sekitar TPS3R Randu Alas	55
Tabel 4.2 Ringkasan Hasil Uji Emisi SO ₂ Insinerator.....	58
Tabel 4.3 Estimasi Neraca Massa Sulfur dan Potensi Pembentukan SO ₂ ...	59
Tabel 4.4 Konsentrasi Model SO ₂ 1 jam di Lima Reseptor.....	63
Tabel 4.5 Konsentrasi Model SO ₂ 24 jam pada Reseptor Permukiman	64
Tabel 4.6 Perbandingan Konsentrasi Observasi dan Prediksi Model.....	65
Tabel 4.7 Hasil Evaluasi Kinerja Model AERMOD	66
Tabel 4.8 Distribusi Jenis Penyakit Pernapasan Masyarakat Kecamatan Ngaglik Tahun 2025.....	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Alur Kerangka Berpikir Penelitian	6
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	37
Gambar 3.2 Mawar Angin Lokasi Studi.....	39
Gambar 3.3 Penentuan Lokasi Titik Uji	41
Gambar 4.1 Peta Lokasi Penelitian dan Titik Sampling Udara Ambien	54
Gambar 4.2 Grafik Konsentrasi SO ₂ Berdasarkan Waktu Pengukuran di Setiap Titik Sampling.....	56
Gambar 4.3 Perbandingan Konsentrasi Rata-rata SO ₂ terhadap Baku Mutu Udara Ambien.....	57
Gambar 4.4 Peta Isopleth Konsentrasi SO ₂ Periode 1 Jam.....	62
Gambar 4.5 Peta Isopleth Konsentrasi SO ₂ Periode 24 Jam.....	62
Gambar 4.6 Distribusi Spasial Nilai RQ Paparan SO ₂ Periode 1 Jam di Sekitar TPS3R Randu Alas	69
Gambar 4.7 Distribusi Spasial Nilai RQ Paparan SO ₂ Periode 24 Jam di Sekitar TPS3R Randu Alas	70
Gambar 4.8 Grafik Jumlah Kasus Penyakit Pernapasan Masyarakat Kecamatan Ngaglik Tahun 2025.....	74

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Peta Lokasi Titik Pengukuran Udara Ambien	89
Lampiran 2 Dokumentasi Pengambilan Sampel Udara Ambien.....	90
Lampiran 3 Dokumentasi Uji Emisi	92
Lampiran 4 Dokumentasi Uji Kualitas Udara di Laboratorium Kualitas Lingkungan	93
Lampiran 5 Standar Kurva Kalibrasi.....	94
Lampiran 6 Hasil Pengukuran Sampel Udara Ambien.....	95
Lampiran 7 Hasil Perhitungan Emisi.....	96
Lampiran 8 Peta Isopleth Konsentrasi 1 Jam	97
Lampiran 9 Peta Isopleth Konsentrasi 24 Jam	98
Lampiran 10 Hasil Uji Validasi.....	99
Lampiran 11 Tabel Metode Estimating a Population Proportion with Specified Absolute Precision.....	100
Lampiran 12 Kuesioner Masyarakat untuk Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan.....	101
Lampiran 13 Pengaturan Grid Reseptor (Receptor Grid) pada Model AERMOD untuk Analisis ARKL.....	103
Lampiran 14 Hasil Konsentrasi SO ₂ Periode 1 Jam sebagai Input Analisis Risiko pada Grid ARKL.....	105
Lampiran 15 Hasil Konsentrasi SO ₂ Periode 24 Jam sebagai Input Analisis Risiko pada Grid ARKL.....	106

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kualitas udara merupakan faktor penting yang memengaruhi kesehatan masyarakat dan kelestarian lingkungan secara global. Menurut pemantauan *Air Quality Life Index* (AQLI), kondisi kualitas udara di Indonesia menunjukkan kecenderungan penurunan akibat meningkatnya konsentrasi polutan udara. Sekitar 91% penduduk Indonesia tinggal di wilayah dengan tingkat polusi udara yang melebihi batas aman yang ditetapkan oleh World Health Organization (WHO), terutama akibat paparan polutan seperti partikulat halus ($PM_{2,5}$), nitrogen dioksida (NO_2), dan sulfur dioksida (SO_2) (Sudaryanto et al., 2021). Di antara berbagai polutan tersebut, SO_2 merupakan salah satu gas pencemar yang memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Gas ini dihasilkan dari proses pembakaran bahan yang mengandung sulfur dan bersifat iritatif terhadap sistem pernapasan. Paparan SO_2 dalam jangka pendek dapat memicu peradangan saluran pernapasan dan memperburuk gejala asma, khususnya pada kelompok rentan seperti anak-anak dan lansia. Sementara itu, paparan jangka panjang dapat meningkatkan risiko penyakit pernapasan kronis seperti bronkitis, gangguan fungsi paru, serta peningkatan risiko kematian (US EPA, 2017). Selain berdampak terhadap kesehatan manusia, SO_2 juga berperan dalam pembentukan hujan asam yang dapat mempercepat degradasi material bangunan dan mengganggu keseimbangan ekosistem (Rofida, 2025).

Di Indonesia, pencemaran udara menjadi tantangan yang semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi, urbanisasi, serta aktivitas pembakaran di sektor energi maupun pengelolaan limbah. Salah satu sumber utama emisi SO_2 berasal dari pembakaran bahan bakar fosil dan proses insinerasi limbah yang mengandung senyawa sulfur, baik dalam skala industri maupun rumah tangga (Sarwono et al., 2025). Pemantauan di beberapa wilayah menunjukkan bahwa potensi peningkatan konsentrasi SO_2 masih terjadi, terutama di sekitar area pembakaran terbuka dan fasilitas insinerator yang belum memiliki sistem pengendalian emisi yang optimal (Devara, 2025). Oleh karena itu,

diperlukan kajian ilmiah yang mampu menggambarkan pola sebaran dan tingkat risiko paparan SO_2 terhadap masyarakat di sekitar sumber emisi.

Salah satu lokasi yang memiliki potensi emisi SO_2 adalah Tempat Pengolahan Sampah *Reduce-Reuse-Recycle* (TPS3R) Randu Alas, yang terletak di Kecamatan Ngaglik, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Fasilitas ini menggunakan insinerator sederhana untuk mengurangi volume limbah padat yang tidak dapat terurai atau diolah kembali. Proses pembakaran pada insinerator menghasilkan berbagai gas buang, termasuk SO_2 , yang dapat berdampak terhadap kualitas udara ambien di sekitarnya. Kondisi lokasi yang berdekatan dengan permukiman padat penduduk menimbulkan kekhawatiran akan paparan gas buang terhadap masyarakat, terutama bagi kelompok rentan seperti anak-anak dan lansia. Meskipun demikian, penelitian mengenai distribusi spasial SO_2 dari emisi insinerator skala komunitas di wilayah Yogyakarta masih sangat terbatas.

Pemantauan kualitas udara di Daerah Istimewa Yogyakarta saat ini dilakukan melalui stasiun pemantauan kualitas udara yang dikelola oleh instansi pemerintah terkait, seperti Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) maupun pemerintah daerah melalui Dinas Lingkungan Hidup. Namun, jaringan pemantauan tersebut belum sepenuhnya mampu merepresentasikan kondisi kualitas udara secara menyeluruh di seluruh wilayah, termasuk kawasan sekitar TPS3R Randu Alas. Cakupan pengukuran yang terbatas menyebabkan diperlukan metode tambahan untuk memperkirakan konsentrasi polutan secara spasial dan temporal yang lebih detail. Pemodelan dispersi udara dapat menjadi salah satu pendekatan yang efektif untuk menggambarkan distribusi konsentrasi polutan di atmosfer, terutama pada lokasi yang belum terjangkau oleh stasiun pemantauan.

Salah satu model yang banyak digunakan dalam kajian dispersi udara adalah *American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model* (AERMOD). Model ini mampu memperkirakan penyebaran polutan di udara berdasarkan karakteristik sumber emisi, parameter meteorologi, serta kondisi topografi setempat (Natsir et al., 2017). AERMOD efektif digunakan untuk memprediksi sebaran polutan gas dari sumber titik (*point source*) seperti cerobong insinerator, serta menghasilkan distribusi konsentrasi polutan secara

spasial. Informasi tersebut dapat digunakan sebagai dasar dalam analisis risiko kesehatan dan evaluasi kesesuaian terhadap baku mutu udara ambien.

Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada pemodelan dispersi polutan di kawasan industri atau wilayah dengan kepadatan lalu lintas tinggi, sedangkan kajian mengenai dispersi SO_2 dari fasilitas insinerator tempat pengolahan sampah skala komunitas masih terbatas, khususnya di wilayah semi-perkotaan seperti Sleman. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dispersi gas SO_2 dari emisi insinerator di TPS3R Randu Alas menggunakan AERMOD serta menganalisis potensi risiko kesehatan akibat paparannya terhadap masyarakat sekitar. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi upaya pengendalian emisi, peningkatan pengelolaan fasilitas insinerator, serta perlindungan kesehatan masyarakat dan lingkungan di wilayah sekitar TPS3R Randu Alas.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Berapa nilai konsentrasi SO_2 yang tersebar di lingkungan sekitar TPS3R Randu Alas berdasarkan hasil pengukuran?
2. Bagaimana pola dispersi gas SO_2 dari emisi insinerator di TPS3R Randu Alas berdasarkan hasil pemodelan menggunakan AERMOD?
3. Bagaimana tingkat potensi risiko kesehatan masyarakat akibat paparan gas SO_2 di area sekitar lokasi insinerator berdasarkan hasil pemodelan dan parameter paparan?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menentukan tingkat konsentrasi SO_2 di wilayah sekitar insinerator berdasarkan hasil pengukuran sumber emisi dan pengambilan sampel udara ambien.

2. Mengetahui pola dispersi konsentrasi SO_2 yang dihasilkan dari emisi insinerator di TPS3R Randu Alas menggunakan perangkat lunak AERMOD.
3. Menganalisis potensi risiko kesehatan masyarakat akibat paparan gas SO_2 di sekitar TPS3R Randu Alas berdasarkan hasil pemodelan dispersi dan perhitungan indeks risiko non-karsinogenik.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menyediakan informasi ilmiah mengenai distribusi konsentrasi SO_2 dari kegiatan insinerasi di TPS3R Randu Alas yang dapat digunakan oleh pengelola TPS3R, pemerintah daerah, dan instansi lingkungan hidup dalam perencanaan strategi pengendalian pencemaran udara.
2. Menjadi referensi awal dalam penilaian risiko kesehatan lingkungan akibat paparan gas buang insinerator, khususnya bagi masyarakat di sekitar fasilitas pengolahan sampah berbasis komunitas.
3. Memberikan dasar pertimbangan ilmiah bagi kebijakan pengelolaan insinerator dan perlindungan kesehatan masyarakat, terutama di wilayah padat penduduk yang berdekatan dengan sumber emisi udara.

1.5. Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini mencakup hal-hal sebagai berikut:

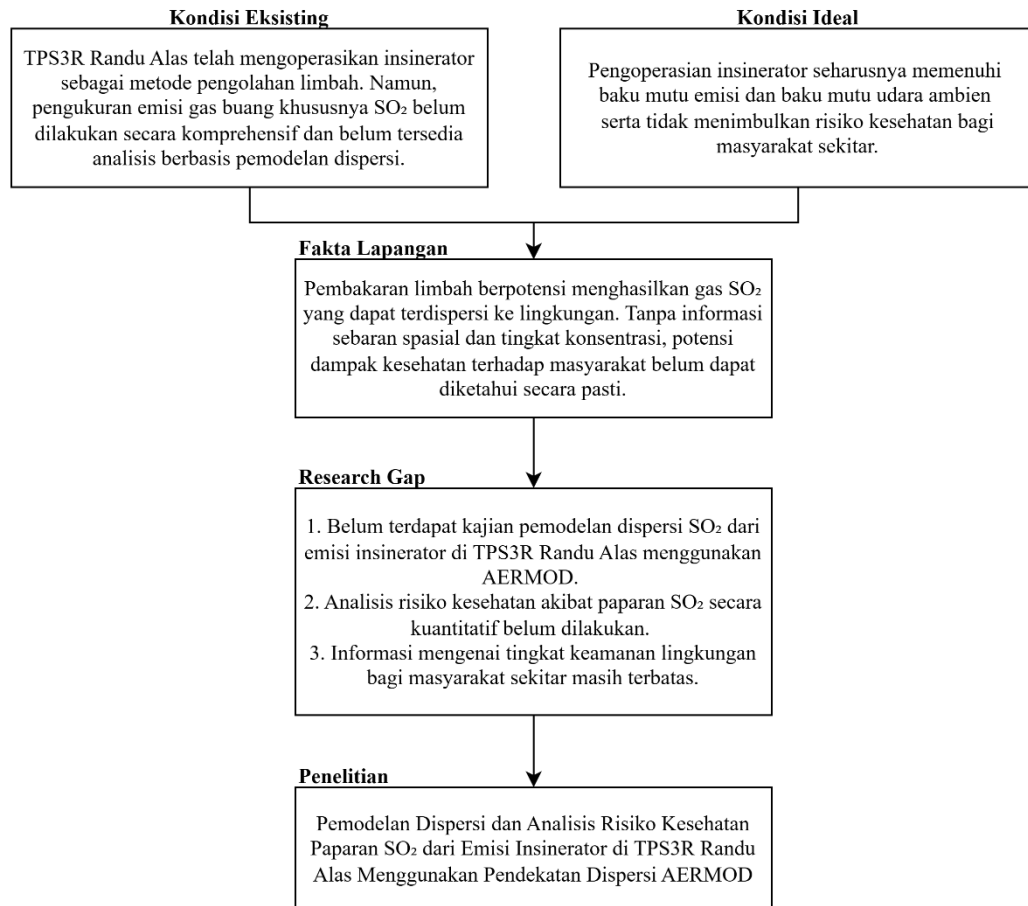
1. Lokasi penelitian berada di Tempat Pengolahan Sampah *Reduce-Reuse-Recycle* (TPS3R) Randu Alas yang terletak di Padukuhan Randu Alas, Kecamatan Ngaglik, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Wilayah studi pada pemodelan dispersi dibatasi pada domain $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ yang berpusat pada cerobong insinerator sebagai sumber emisi, sedangkan titik pengambilan sampel udara ambien berada di sekitar sumber emisi dengan jarak maksimum 0-250 meter dari cerobong insinerator.
2. Objek penelitian berfokus pada emisi gas sulfur dioksida (SO_2) yang dihasilkan dari proses pembakaran limbah pada insinerator sebagai sumber titik (*point source*) utama di TPS3R Randu Alas.

3. Data input pemodelan meliputi parameter teknis insinerator, seperti laju emisi massa SO₂ (g/s), suhu gas buang, kecepatan aliran gas, tinggi dan diameter cerobong yang diperoleh dari hasil uji emisi, serta data meteorologi yang meliputi arah dan kecepatan angin, suhu udara, kelembapan relatif, tekanan udara, tutupan awan, ketinggian awan (*ceiling height*), curah hujan, serta radiasi matahari.
4. Pemodelan dispersi udara dilakukan menggunakan perangkat lunak AERMOD versi 8.9.0, yang digunakan untuk mensimulasikan distribusi spasial konsentrasi SO₂ di udara ambien. Hasil pemodelan akan divisualisasikan dalam bentuk peta yang menggambarkan sebaran polutan di sekitar TPS3R Randu Alas.
5. Analisis risiko kesehatan dilakukan berdasarkan hasil pemodelan konsentrasi SO₂ dan parameter paparan masyarakat di area terdampak. Penilaian risiko dilakukan menggunakan pendekatan non-karsinogenik (inhalasi) dengan membandingkan nilai *intake* harian (I) terhadap *Reference Concentration* (RfC) dari SO₂ sebagaimana ditetapkan oleh *United States Environmental Protection Agency* (US EPA).
6. Penilaian kualitas udara dilakukan dengan membandingkan hasil pemodelan konsentrasi SO₂ terhadap standar yang berlaku. Berdasarkan *Permen LHK Nomor 70 Tahun 2016* tentang Baku Mutu Emisi Usaha dan/atau Kegiatan Pengolahan Sampah Secara Termal, nilai ambang batas emisi SO₂ adalah 210 mg/Nm³. Sedangkan untuk udara ambien, acuan yang digunakan mengacu pada *PP Nomor 22 Tahun 2021* dengan baku mutu SO₂ sebesar 150 µg/m³ (rata-rata 1 jam).
7. Data pendukung kesehatan masyarakat dikumpulkan secara kualitatif melalui survei atau wawancara terhadap warga yang tinggal di sekitar area TPS3R Randu Alas untuk mengidentifikasi keluhan atau gejala gangguan pernapasan ringan yang berpotensi terkait paparan gas buang.

1.6. Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir penelitian disusun untuk menggambarkan alur penelitian mulai dari kondisi eksisting pengoperasian insinerator di TPS3R Randu

Alas, permasalahan emisi SO_2 yang dihasilkan, hingga kebutuhan analisis dispersi dan risiko kesehatan lingkungan menggunakan pendekatan pemodelan AERMOD. Adapun alur kerangka berpikir penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Alur Kerangka Berpikir Penelitian

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. TPS3R Randu Alas dan Wilayah Studi

Tempat Pengolahan Sampah dengan konsep *Reduce-Reuse-Recycle* (TPS3R) merupakan salah satu strategi pengelolaan sampah berbasis masyarakat yang bertujuan mengurangi beban sampah sejak dari sumbernya. Sistem ini mendorong partisipasi aktif warga dalam memilah, mendaur ulang, dan mengolah sampah secara mandiri, sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada Tempat Pembuangan Akhir (TPA) serta meningkatkan efisiensi pengelolaan lingkungan (Putra, 2025). Pendekatan ini menandai perubahan paradigma dari sistem tradisional “kumpul-angkut-buang” menjadi pendekatan “pilah-olah-manfaat” yang lebih ramah lingkungan (Wibisono et al., 2024).

TPS3R Randu Alas yang berlokasi di Kecamatan Ngaglik, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, merupakan contoh implementasi nyata sistem pengelolaan sampah berbasis komunitas. Operasional TPS3R ini dikelola oleh masyarakat melalui Lembaga Pemberdayaan Masyarakat (LPM), yang menangani pengelolaan limbah rumah tangga mulai dari pemilahan, pengolahan organik, hingga penanganan residu (Maulana et al., 2023). Salah satu metode pengolahan residu di fasilitas ini adalah pembakaran menggunakan insinerator sederhana. Meskipun efektif dalam mengurangi volume sampah, proses pembakaran tersebut menghasilkan gas buang yang mengandung polutan berbahaya seperti Sulfur dioksida (SO_2), Nitrogen oksida (NO_x), dan Karbon monoksida (CO) yang berpotensi mencemari udara ambien (Larasati & Santoso, 2023).

Secara geografis, lokasi TPS3R Randu Alas berada di wilayah semi-perkotaan dengan kepadatan penduduk yang cukup tinggi dan jarak yang relatif dekat antara cerobong insinerator dan area permukiman. Beberapa rumah penduduk bahkan berjarak kurang dari 100 meter dari sumber emisi, sehingga meningkatkan risiko paparan langsung terhadap gas-gas hasil pembakaran seperti SO_2 (Widyarsana & Zafira, 2015). Gas ini dapat bereaksi dengan uap air di udara membentuk asam sulfat (H_2SO_4), yang menjadi penyebab hujan asam dan dapat

merusak ekosistem serta mengiritasi saluran pernapasan manusia. Faktor meteorologi seperti arah angin, kelembapan, dan stabilitas atmosfer turut memengaruhi pola penyebaran gas tersebut di lingkungan sekitar (Rahayu et al., 2021).

Selain faktor geografis, aspek sosial masyarakat sekitar juga menjadi faktor penting dalam penilaian risiko lingkungan. Mayoritas penduduk sekitar TPS3R terdiri dari keluarga muda dan lansia, dengan tingkat kesadaran lingkungan yang masih rendah. Aktivitas seperti pembakaran sampah pribadi, penggunaan kayu bakar, serta lalu lintas kendaraan bermotor di sekitar area turut memperburuk kualitas udara lokal (Susilowati et al., 2023). Minimnya pengetahuan masyarakat tentang dampak paparan gas SO₂ menyebabkan rendahnya tindakan pencegahan, padahal gas ini dapat memicu gangguan pernapasan kronis, terutama bagi kelompok rentan (Rahayu et al., 2021).

Pemilihan TPS3R Randu Alas sebagai lokasi penelitian didasarkan pada dua pertimbangan utama, yaitu intensitas operasional insinerator yang cukup tinggi dan kedekatan fasilitas dengan kawasan permukiman padat. Kondisi ini merepresentasikan banyak TPS3R di Indonesia yang beroperasi dengan teknologi sederhana tanpa sistem pengendalian emisi yang memadai, namun tetap menjadi ujung tombak pengelolaan sampah berbasis masyarakat (Septiani et al., 2019). Oleh karena itu, kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dan praktis terhadap peningkatan standar operasional TPS3R serta kebijakan pengendalian emisi di tingkat daerah.

Penelitian ini mengintegrasikan pemodelan AERMOD untuk memprediksi sebaran konsentrasi SO₂ dari cerobong insinerator serta melakukan analisis risiko kesehatan berbasis metode *Environmental Health Risk Assessment* (EHRA). Pendekatan ini akan menghasilkan gambaran spasial mengenai potensi risiko paparan gas pencemar terhadap masyarakat sekitar. Data dan hasil analisis diharapkan menjadi dasar bagi pemerintah daerah dan pengelola TPS3R dalam merancang strategi mitigasi emisi serta kebijakan pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan dan berorientasi pada kesehatan masyarakat (Tamba & Laksmono, 2024).

2.2. Kualitas Udara Ambien dan Pencemaran Udara

2.2.1 Pengertian dan Komposisi Udara Ambien

Menurut Peraturan Gubernur Daerah Istimewa Yogyakarta Nomor 8 Tahun 2010 tentang Program Langit Biru Tahun 2009-2013, udara ambien didefinisikan sebagai udara bebas yang berada di lapisan troposfer permukaan bumi dalam wilayah yurisdiksi Republik Indonesia, yang dibutuhkan untuk menunjang kehidupan serta memengaruhi kesehatan manusia, makhluk hidup, dan unsur lingkungan lainnya. Perubahan komposisi alami udara dapat terjadi akibat aktivitas makhluk hidup maupun proses antropogenik. Apabila perubahan tersebut melampaui batas konsentrasi tertentu hingga udara kehilangan kemampuannya untuk mendukung fungsi lingkungan dan kesehatan, maka udara tersebut dikategorikan sebagai udara tercemar.

Komposisi udara bersifat fluktuatif dan dinamis, bergantung pada kondisi geografis, ketinggian, vegetasi, serta tingkat aktivitas manusia di suatu wilayah. Misalnya, udara di dataran tinggi memiliki komposisi yang berbeda dengan dataran rendah; wilayah khatulistiwa berbeda dengan wilayah kutub; daerah berhutan lebat berbeda dengan kawasan industri; dan daerah pedesaan memiliki karakteristik udara yang tidak sama dengan kawasan perkotaan (Hemida, 2021). Secara umum, udara kering dan bersih pada lapisan homosfer tersusun atas gas-gas utama seperti nitrogen (N_2), oksigen (O_2), argon (Ar), karbon dioksida (CO_2), neon (Ne), helium (He), metana (CH_4), kripton (Kr), dinitrogen oksida (N_2O), hidrogen (H_2), xenon (Xe), dan ozon (O_3) dalam jumlah yang relatif stabil (Cahyono, 2017).

Sementara itu, udara ambien alami yang belum terpengaruh aktivitas manusia juga mengandung sejumlah kecil partikulat dan gas minor, baik organik maupun anorganik. Komponen tersebut meliputi sekitar 1×10^{-6} % amonia (NH_3), 3.3×10^{-5} % dinitrogen oksida (N_2O), 1×10^{-7} % nitrogen dioksida (NO_2), 2×10^{-8} % sulfur dioksida (SO_2), serta 2×10^{-6} % ozon (O_3). Walaupun kadarnya sangat kecil, gas-gas tersebut dapat berperan sebagai polutan udara alami ketika konsentrasinya meningkat akibat pengaruh antropogenik (Prodjosantoso & Padmaningrum, 2011).

2.2.2 Jenis dan Sumber Pencemar Udara

Pencemaran udara merupakan kondisi ketika zat fisik, kimia, atau biologi terdapat di atmosfer dalam jumlah yang dapat mengganggu keseimbangan lingkungan serta membahayakan kesehatan manusia, hewan, dan makhluk hidup lainnya. Pencemaran ini terjadi apabila kadar suatu zat melebihi batas alami atau ambang yang dapat diterima lingkungan, sehingga menyebabkan udara tidak lagi memenuhi fungsi ekologisnya (Sudarti et al., 2021).

Secara umum, sumber pencemaran udara dapat dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu sumber alamiah (*natural sources*) dan sumber antropogenik (*anthropogenic sources*). Sumber alamiah meliputi aktivitas seperti letusan gunung berapi, kebakaran hutan alami, erosi tanah oleh angin, dan proses biologis dari makhluk hidup yang melepaskan gas ke atmosfer. Sementara itu, sumber antropogenik berasal dari kegiatan manusia seperti transportasi, proses industri, pembakaran bahan bakar fosil, dan emisi dari fasilitas pengolahan limbah. Berdasarkan lokasinya, pencemaran udara juga dibedakan menjadi pencemaran udara dalam ruangan (*indoor pollution*) dan pencemaran udara luar ruangan (*outdoor pollution*). Pencemaran dalam ruangan dapat terjadi di rumah, sekolah, atau kantor akibat aktivitas memasak, asap rokok, dan bahan kimia bangunan, sedangkan pencemaran luar ruangan umumnya berasal dari emisi kendaraan bermotor, asap industri, proses perkapalan, serta aktivitas pembakaran terbuka. Lebih lanjut, berdasarkan sifat pergerakannya, sumber pencemar udara dapat diklasifikasikan menjadi sumber diam (*stationary sources*) dan sumber bergerak (*mobile sources*). Sumber diam mencakup fasilitas industri, pembangkit listrik, dan aktivitas rumah tangga, sedangkan sumber bergerak mencakup transportasi darat maupun laut yang menghasilkan emisi gas buang secara langsung ke atmosfer (Husnaneni & Anggriyani, 2024).

Selain berdasarkan asalnya, pencemaran udara juga dikategorikan berdasarkan jenis polutannya, yaitu pencemar primer dan pencemar sekunder. Pencemar primer adalah zat yang langsung dilepaskan dari sumber pencemar, misalnya karbon dioksida (CO₂), karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO₂), dan nitrogen oksida (NO_x) yang dihasilkan dari proses pembakaran. Sementara itu, pencemar sekunder terbentuk melalui reaksi kimia antara polutan primer di

atmosfer. Contoh umumnya adalah pembentukan ozon (O_3) dan kabut fotokimia akibat reaksi antara nitrogen oksida dan senyawa organik volatil di bawah pengaruh sinar matahari (Saidal Siburian & Mar, 2020).

2.2.3 Dampak Pencemaran Udara terhadap Kesehatan dan Lingkungan

Menurut laporan Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional/Bappenas (2023), pencemaran udara termasuk dalam lima besar penyebab kematian tertinggi di Indonesia, setelah hipertensi, kadar gula darah tinggi, kebiasaan merokok, dan obesitas. Data tersebut menunjukkan bahwa polusi udara telah menjadi ancaman serius bagi kesehatan masyarakat dan kesejahteraan lingkungan di berbagai wilayah. Peningkatan konsentrasi polutan di udara ambien, terutama di daerah perkotaan dan industri, memperbesar risiko gangguan kesehatan kronis serta menurunkan kualitas hidup masyarakat.

Dampak kesehatan akibat pencemaran udara sangat beragam dan bergantung pada jenis, konsentrasi, serta lama paparan polutan. Emisi yang berasal dari asap kendaraan bermotor, kegiatan industri, dan pembakaran terbuka dapat memicu gangguan sistem pernapasan seperti asma, infeksi saluran pernapasan akut (ISPA), bronkitis, dan kanker paru-paru. Selain itu, paparan jangka panjang terhadap udara tercemar dapat mengurangi kadar oksigen dalam darah dan menurunkan kapasitas paru, yang pada akhirnya berdampak pada sistem kardiovaskular dan metabolisme tubuh manusia (Sulistiani, 2024). Kondisi tersebut memperlihatkan keterkaitan erat antara kualitas udara dan derajat kesehatan masyarakat, terutama bagi kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan penderita penyakit kronis.

Selain berdampak terhadap kesehatan manusia, pencemaran udara juga memberikan konsekuensi serius terhadap lingkungan hidup. Pertama, kerusakan ekosistem dapat terjadi akibat pembentukan hujan asam yang dihasilkan dari senyawa sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x) di atmosfer. Hujan asam dapat menurunkan pH tanah dan air, merusak vegetasi, serta mengancam keberlanjutan kehidupan akuatik di sungai dan danau. Kedua, penurunan produktivitas pertanian juga menjadi salah satu dampak signifikan dari pencemaran udara. Polutan seperti ozon troposferik (O_3) diketahui mampu

menghambat proses fotosintesis, mengganggu pertumbuhan tanaman, dan menurunkan hasil panen (Arna et al., 2025). Dengan demikian, pencemaran udara tidak hanya menjadi isu kesehatan masyarakat, tetapi juga permasalahan ekologis yang berpotensi mengganggu keseimbangan ekosistem secara luas.

2.2.4 Standar Acuan dan Baku Mutu Udara Ambien Nasional

Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, baku mutu udara ambien didefinisikan sebagai nilai pencemar udara yang ditentang keberadaannya dalam udara ambien. Baku mutu ini berfungsi sebagai tolok ukur untuk menilai apakah kualitas udara di suatu wilayah masih berada dalam kondisi aman bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Apabila kadar pencemar di udara melebihi nilai ambang batas tersebut, maka udara dikategorikan tercemar dan memerlukan tindakan pengendalian atau perbaikan kualitas.

Dalam konteks penelitian ini, acuan baku mutu udara ambien digunakan untuk membandingkan hasil pemodelan konsentrasi polutan di udara dengan nilai ambang batas nasional. Nilai acuan yang digunakan mengacu pada Lampiran VII Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021. Dalam peraturan tersebut, ditetapkan bahwa konsentrasi maksimum sulfur dioksida (SO_2) di udara ambien tidak boleh melebihi $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk rata-rata 1 jam dan $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk rata-rata 24 jam. Standar ini menjadi dasar penting dalam menentukan tingkat kepatuhan suatu wilayah terhadap baku mutu udara, serta dalam menilai sejauh mana aktivitas antropogenik, termasuk pembakaran pada insinerator, berkontribusi terhadap pencemaran udara.

Selain itu, penentuan baku mutu emisi dari sumber pencemar juga diatur secara khusus dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.70/MENLHK/SETJEN/KUM.1/8/2016 tentang Baku Mutu Emisi Usaha dan/atau Kegiatan Pengelolaan Sampah dengan Pembakaran Terkendali (Insinerator). Peraturan ini menetapkan batas maksimum konsentrasi berbagai zat pencemar, termasuk SO_2 , NO_2 , CO , HCl , HF , dan partikulat, yang diperbolehkan keluar dari cerobong insinerator. Ketentuan

tersebut digunakan sebagai acuan teknis pengendalian emisi insinerator agar tidak melebihi nilai ambang batas yang dapat menurunkan kualitas udara ambien. Dengan demikian, pengendalian emisi berbasis regulasi ini menjadi bagian penting dalam upaya menjaga kualitas udara di sekitar fasilitas pengolahan sampah berbasis insinerator.

2.3. Sulfur Dioksida (SO₂)

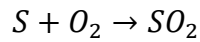
2.3.1 Karakteristik Fisik dan Kimia SO₂

Menurut *National Center for Biotechnology Information* (2025), sulfur dioksida (SO₂) merupakan gas tidak berwarna yang memiliki bau menyengat dan khas belerang. Dalam kondisi bertekanan, gas ini dapat berubah menjadi bentuk cair dan sangat mudah larut dalam air. SO₂ dihasilkan dari berbagai aktivitas pembakaran, khususnya yang melibatkan bahan bakar fosil seperti batubara dan minyak bumi. Selain berasal dari aktivitas manusia, sumber alami SO₂ juga ditemukan pada letusan gunung berapi yang melepaskan gas belerang ke atmosfer. Setelah dilepaskan ke udara, SO₂ dapat bereaksi dengan oksigen membentuk sulfur trioksida (SO₃) dan senyawa turunan lainnya seperti sulfat (SO₄²⁻). Gas ini juga mudah larut dalam air, menghasilkan asam sulfat (H₂SO₄) yang selanjutnya dapat teroksidasi menjadi asam sulfat (H₂SO₄), sedangkan sebagian SO₂ dapat terserap oleh tanah (Ramadhan, 2025).

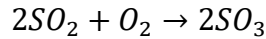
Secara kimiawi, SO₂ merupakan senyawa yang tidak stabil dan sangat reaktif terhadap gas-gas lain di atmosfer. Meskipun bersifat reaktif, gas ini tidak mudah terbakar dan dapat terdeteksi oleh indra penciuman manusia pada konsentrasi antara 0,3 hingga 1,0 ppm (Buanawati et al., 2017). Di atmosfer, sebagian besar unsur belerang berada dalam bentuk gas, khususnya dalam bentuk sulfur oksida (SO_x) yang terdiri dari SO₂ dan SO₃. Kedua senyawa ini berperan penting dalam pembentukan hujan asam dan proses kimia atmosfer lain yang memengaruhi kualitas udara. Tingkat emisi SO_x di udara sangat bergantung pada kandungan sulfur dalam bahan bakar, serta efisiensi proses pembakarannya (Sopiah, 2025).

Secara reaksi kimia, pembentukan sulfur dioksida terjadi melalui kombinasi unsur sulfur (S) dengan oksigen (O₂) selama proses pembakaran,

sebagaimana telah dijelaskan oleh Abumounshar et al. (2021) pada persamaan berikut:



Gas SO_2 yang sudah terbentuk kemudian dapat mengalami reaksi oksidasi lanjutan di atmosfer dan menghasilkan sulfur trioksida (SO_3) melalui mekanisme:



Proses oksidasi ini berperan penting dalam dinamika kimia atmosfer, karena SO_3 yang terbentuk akan bereaksi dengan uap air menghasilkan asam sulfat (H_2SO_4) yang merupakan komponen utama hujan asam. Dengan demikian, keberadaan SO_2 di atmosfer tidak hanya menurunkan kualitas udara, tetapi juga berkontribusi terhadap perubahan sifat kimia lingkungan secara luas.

2.3.2 Sumber Emisi SO_2 (Alami dan Antropogenik)

Sumber pencemaran udara pada dasarnya dapat dikategorikan menjadi dua kelompok utama, yaitu sumber alami dan sumber antropogenik (Riza & Mahmudah, 2019). Kedua sumber ini berkontribusi terhadap keberadaan gas sulfur dioksida (SO_2) di atmosfer, meskipun dalam proporsi dan intensitas yang berbeda. Secara alami, SO_2 dilepaskan ke udara melalui berbagai proses geologis dan biologis yang terjadi di permukaan bumi.

Sumber-sumber alami SO_2 terutama berasal dari aktivitas vulkanik, yang melepaskan gas belerang dalam jumlah besar ke atmosfer selama erupsi gunung berapi. Selain itu, proses pembusukan bahan organik oleh mikroorganisme anaerob dan reduksi biologis senyawa sulfat (SO_4^{2-}) di lingkungan perairan atau tanah juga menghasilkan gas SO_2 dalam jumlah kecil tetapi terus-menerus (Wibawa, 2022). Emisi alami ini merupakan bagian dari siklus sulfur global, yang menjaga keseimbangan alami antara sulfur di atmosfer, tanah, dan laut.

Di sisi lain, sumber antropogenik atau buatan merupakan kontributor utama peningkatan konsentrasi SO_2 di udara ambien, terutama di wilayah industri dan perkotaan. Sumber antropogenik terbesar berasal dari pembakaran bahan bakar fosil seperti batubara dan minyak bumi dalam kegiatan industri, pembangkit listrik, dan transportasi. Kandungan sulfur dalam batubara sangat menentukan jumlah SO_2 yang diemisikan — semakin tinggi kadar sulfurnya, semakin besar

pula potensi pembentukan gas tersebut. Selain menghasilkan gas SO_2 , pembakaran batubara juga menghasilkan *fly ash* yang mengandung senyawa sulfur dan ion logam berat. Zat-zat ini dapat bereaksi dengan uap air di atmosfer dan membentuk asam kuat yang berperan dalam proses terjadinya hujan asam (Chou, 2012).

2.3.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Dispersi SO_2

Perbedaan konsentrasi polutan udara, termasuk sulfur dioksida (SO_2), sangat dipengaruhi oleh faktor meteorologis seperti suhu udara, tekanan atmosfer, kelembapan spesifik, dan radiasi matahari. Menurut Rahman et al. (2022), peningkatan suhu dan perubahan tekanan udara dapat mengubah pola pergerakan massa udara, yang pada akhirnya memengaruhi distribusi dan konsentrasi polutan di atmosfer. Radiasi matahari juga memainkan peran penting dalam proses reaksi kimia fotokatalitik, yang mampu mengubah gas SO_2 dan NO_2 menjadi partikel aerosol berupa sulfat (SO_4^{2-}) dan nitrat (NO_3^-). Proses ini menjadi mekanisme alami transformasi gas menjadi partikulat halus di udara, yang turut menentukan tingkat pencemaran di suatu wilayah.

Suhu udara di permukaan bumi dipengaruhi oleh penyinaran matahari, sudut datang sinar matahari, kondisi topografi, serta keberadaan awan. Faktor-faktor tersebut menentukan variasi suhu di setiap lokasi dan waktu. Menurut Mustamin et al. (2017), distribusi suhu yang tidak merata di permukaan bumi menyebabkan terjadinya perbedaan densitas udara, yang menjadi pendorong terbentuknya pola aliran udara baik secara vertikal maupun horizontal. Ketika suhu udara meningkat, konveksi termal akan memperkuat pergerakan udara ke atas, sehingga konsentrasi polutan seperti SO_2 di dekat permukaan cenderung menurun akibat proses pencampuran vertikal. Sebaliknya, pada kondisi suhu rendah dan lapisan udara stabil, polutan cenderung terperangkap di lapisan bawah atmosfer dan meningkatkan konsentrasi pencemar lokal.

Hasil penelitian Halulanga et al. (2021) menunjukkan bahwa persebaran SO_2 sangat dipengaruhi oleh dinamika udara ambien, terutama kecepatan dan arah angin. Polutan akan mengikuti arah aliran udara; semakin tinggi kecepatan angin, semakin luas pula area penyebarannya, namun konsentrasi di lokasi sumber akan

menurun karena terjadi proses pengenceran. Kelembapan udara juga memiliki peran penting, di mana peningkatan kelembapan dapat mempercepat pelarutan SO_2 dalam uap air dan menurunkan konsentrasinya di udara. Selain faktor meteorologi, karakteristik fisik sumber emisi turut menentukan pola sebaran SO_2 . Dalam konteks insinerator, tinggi cerobong, kecepatan keluaran gas buang, dan suhu gas pada cerobong sangat berpengaruh terhadap jarak dan arah dispersi polutan. Cerobong dengan tinggi yang memadai memungkinkan gas SO_2 terdilusi secara efektif di lapisan udara atas, sehingga mengurangi paparan langsung pada area permukiman di sekitar sumber emisi. Namun, jika tinggi cerobong rendah atau kecepatan keluaran gas tidak cukup kuat, polutan cenderung terakumulasi di lapisan bawah atmosfer dan meningkatkan risiko pencemaran udara lokal.

2.3.4 Dampak Paparan SO_2 terhadap Kesehatan dan Lingkungan

Menurut *Environmental Protection Agency* (2025), paparan sulfur dioksida (SO_2) dalam jangka pendek dapat menyebabkan gangguan pada sistem pernapasan manusia, terutama pada saluran pernapasan bagian atas. Konsentrasi SO_2 yang tinggi di udara dapat memicu iritasi saluran napas, batuk, dan kesulitan bernapas, terutama pada individu dengan penyakit pernapasan seperti asma. Kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, serta penderita gangguan paru kronis menunjukkan tingkat sensitivitas yang lebih tinggi terhadap efek gas ini. Dalam konsentrasi rendah sekalipun, paparan berulang dapat memperburuk fungsi paru-paru dan menurunkan kapasitas pernapasan seseorang dari waktu ke waktu.

Emisi SO_2 di atmosfer tidak hanya berdampak langsung terhadap kesehatan, tetapi juga berkontribusi pada pembentukan senyawa sekunder berupa oksida sulfur (SO_x) dan partikulat halus ($\text{PM}_{2,5}$ dan PM_{10}). Menurut Masito (2018), SO_2 yang bereaksi dengan senyawa lain seperti uap air dan oksigen dapat menghasilkan partikel sulfat yang berukuran sangat kecil dan mampu menembus jauh ke dalam sistem pernapasan manusia. Akumulasi partikel ini dapat menimbulkan inflamasi paru, memperburuk kondisi asma, serta meningkatkan risiko penyakit kardiovaskular dan pernapasan kronis. Oleh karena itu, peningkatan konsentrasi SO_2 di udara sering dikaitkan dengan peningkatan kasus infeksi saluran pernapasan akut (ISPA) di kawasan perkotaan padat penduduk.

Secara umum, dampak sulfur dioksida tidak hanya terbatas pada manusia tetapi juga pada hewan dan lingkungan. Gas ini dapat menyebabkan iritasi mata dan gangguan pernapasan pada hewan ternak, serta dalam konsentrasi tinggi dapat menimbulkan kematian massal. Menurut Damri et al. (2016), kejadian di Belgia dengan konsentrasi SO_2 mencapai sekitar 38 ppm menyebabkan lebih dari 60 orang meninggal dunia dan ratusan ternak mati akibat keracunan gas. Kasus tersebut menunjukkan bahwa peningkatan mendadak kadar SO_2 di udara ambien dapat menimbulkan dampak fatal. Selain itu, SO_2 juga berperan dalam pembentukan hujan asam, yang menyebabkan penurunan pH tanah dan air, kerusakan vegetasi, serta degradasi material bangunan di lingkungan sekitar.

Selain berdampak pada kesehatan manusia dan hewan, gas sulfur dioksida (SO_2) dan sulfur trioksida (SO_3) juga memberikan pengaruh serius terhadap kualitas lingkungan fisik. Ketika kedua gas ini bereaksi dengan uap air di atmosfer, akan terbentuk asam sulfat (H_2SO_4) dan asam sulfit (H_2SO_3) yang kemudian turun bersama air hujan, membentuk hujan asam. Menurut Fontana & Greene (1978), pH air hujan yang mengandung senyawa oksida belerang dapat turun hingga 3-4, jauh di bawah kondisi normal pH 5,6. Kondisi tersebut mempercepat proses korosi pada logam, kerusakan struktur bangunan, serta degradasi permukaan material yang terekspos langsung terhadap air hujan. Fenomena ini menjelaskan mengapa kawasan perkotaan dengan tingkat emisi SO_2 tinggi sering mengalami kerusakan infrastruktur lebih cepat dibandingkan wilayah dengan udara yang lebih bersih.

2.4. Emisi SO_2 dari Proses Insinerasi Sampah

Insinerator merupakan perangkat yang digunakan untuk mengolah limbah padat melalui proses pembakaran terkendali pada suhu tinggi, umumnya mencapai 800°C atau lebih, dengan tujuan utama mengurangi volume dan massa sampah (Patil et al., 2014). Teknologi ini banyak diterapkan di berbagai fasilitas pengelolaan sampah, termasuk Tempat Pengolahan Sampah *Reduce-Reuse-Recycle* (TPS3R), karena kemampuannya mengonversi limbah menjadi abu dan gas buang dalam waktu singkat. Namun demikian, proses pembakaran dalam

insinerator tidak sepenuhnya bebas dari risiko lingkungan karena menghasilkan berbagai jenis polutan udara berbahaya.

Menurut Shetty et al. (2023), pembakaran limbah padat melalui insinerator berpotensi menghasilkan emisi gas pencemar utama, seperti sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida (NO_x), karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2), dan partikulat halus (PM). Dari berbagai jenis emisi tersebut, SO_2 menjadi salah satu parameter yang paling krusial karena sifatnya yang mudah larut dalam air dan reaktif di atmosfer, sehingga berperan dalam pembentukan hujan asam dan aerosol sulfat. Polutan ini juga memiliki efek langsung terhadap kesehatan masyarakat di sekitar lokasi insinerator, terutama pada sistem pernapasan.

Emisi SO_2 dari insinerator terutama berasal dari pembakaran bahan yang mengandung senyawa sulfur, seperti plastik berbahan polivinil klorida (PVC), karet, dan limbah organik tertentu. Proses pembakaran yang tidak sempurna dapat meningkatkan pembentukan SO_2 dan memperbesar risiko pencemaran udara ambien. Pirbadali Somarin dan Peyghambarzadeh (2020) menjelaskan bahwa komposisi limbah, suhu operasi, dan efisiensi sistem pembakaran sangat mempengaruhi jumlah gas SO_2 yang dilepaskan ke atmosfer. Semakin tinggi kandungan sulfur dalam bahan bakar atau limbah yang dibakar, semakin besar pula konsentrasi SO_2 yang dihasilkan.

Selain faktor bahan bakar, desain dan tinggi cerobong insinerator turut menentukan pola sebaran polutan di udara (Prabasari et al., 2025). Cerobong berfungsi sebagai sarana pelepasan emisi gas buang ke atmosfer agar konsentrasi polutan di permukaan tanah dapat diminimalkan. Namun, jika tinggi cerobong tidak memadai, maka polutan seperti SO_2 akan terdispersi pada lapisan atmosfer yang lebih rendah dan berpotensi meningkatkan paparan langsung terhadap masyarakat di sekitar fasilitas TPS3R. Dalam konteks ini, pemodelan dispersi menggunakan AERMOD menjadi penting untuk mengetahui bagaimana karakteristik aliran udara, kondisi meteorologi, dan topografi lokal memengaruhi distribusi konsentrasi gas SO_2 di lingkungan sekitar sumber emisi.

Menurut Narto dan Utari (2020), kelemahan lain dari sistem insinerator adalah kecenderungan melepaskan gas beracun bersamaan dengan emisi gas buang ke udara, serta menghasilkan abu sisa pembakaran sekitar 20% dari total

volume sampah yang dibakar. Selain itu, emisi merkuri dan logam berat dalam bentuk uap juga dapat terlepas bersama gas buang apabila tidak dilengkapi dengan unit pengolahan gas buang (flue gas treatment). Oleh karena itu, penggunaan peralatan pengendali emisi, seperti sistem pencucian gas (wet scrubber) atau filter elektrostatis, menjadi penting untuk menurunkan kadar SO_2 dan polutan lain sebelum dilepaskan ke atmosfer.

Dengan demikian, emisi SO_2 dari insinerator menjadi isu penting dalam pengelolaan kualitas udara di wilayah perkotaan maupun padat penduduk seperti TPS3R Randu Alas, Sleman. Tingginya aktivitas pembakaran yang berlangsung rutin dapat memicu peningkatan kadar SO_2 di udara ambien dan menimbulkan risiko terhadap kesehatan masyarakat di sekitar lokasi. Oleh sebab itu, diperlukan pemodelan dispersi dan analisis risiko kesehatan sebagai langkah evaluatif dalam memastikan operasi insinerator tetap berada dalam batas aman dan sesuai dengan Baku Mutu Emisi Usaha dan/atau Kegiatan Pengolahan Sampah Secara Termal, nilai ambang batas untuk parameter SO_2 ditetapkan sebesar 210 mg/Nm^3 pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Permen LHK) Nomor 70 Tahun 2016.

2.5. Pemodelan Dispersi Polutan Udara

2.5.1 Konsep dan Prinsip Pemodelan Dispersi

Pemodelan dispersi udara merupakan pendekatan matematis yang digunakan untuk mensimulasikan pergerakan, penyebaran, dan distribusi konsentrasi polutan di atmosfer setelah dilepaskan dari suatu sumber emisi (Abidin & Purqon, 2018). Model ini bekerja berdasarkan prinsip dinamika fluida serta proses fisik dan kimia di atmosfer seperti adveksi, difusi, turbulensi, dan reaksi kimia yang terjadi pada gas polutan (Holmes & Morawska, 2006). Melalui pendekatan ini, pola penyebaran polutan seperti sulfur dioksida (SO_2) dapat diprediksi secara spasial dan temporal, sehingga hasilnya dapat digunakan dalam penilaian risiko kesehatan lingkungan, perencanaan tata ruang, dan pengendalian pencemaran udara (Shidqi & AR, 2024).

Pemodelan dispersi memiliki peran penting dalam analisis kualitas udara, terutama di kawasan yang memiliki potensi emisi tinggi seperti fasilitas

insinerator. Model ini membantu memahami bagaimana kondisi meteorologi (arah dan kecepatan angin, suhu, kelembapan, dan stabilitas atmosfer) serta karakteristik topografi dan ketinggian sumber emisi memengaruhi persebaran polutan di udara ambien. Dengan data masukan (*input*) yang akurat, model dispersi mampu memberikan estimasi kuantitatif konsentrasi polutan pada berbagai titik lokasi dan waktu tertentu, sehingga menjadi dasar ilmiah dalam evaluasi dampak lingkungan maupun penyusunan kebijakan mitigasi pencemaran udara.

Dalam konteks penelitian ini, pemodelan dispersi gas SO₂ digunakan untuk memperkirakan pola penyebaran emisi dari cerobong insinerator di TPS3R Randu Alas, Sleman, yang beroperasi di kawasan padat penduduk. Melalui pemodelan ini, dapat diketahui perubahan konsentrasi SO₂ pada berbagai jarak dan arah dari sumber emisi, dengan mempertimbangkan kondisi meteorologi lokal seperti arah angin dominan dan stabilitas atmosfer tahunan. Hasil simulasi dari model dispersi ini menjadi dasar untuk mengidentifikasi area dengan potensi paparan tertinggi, serta menilai tingkat risiko kesehatan masyarakat akibat emisi gas sulfur dioksida di lingkungan sekitar fasilitas pengolahan sampah.

2.5.2 Jenis Model Dispersi (Gaussian, Lagrangian, Eulerian)

Pemodelan dispersi udara digunakan untuk mempelajari pergerakan dan penyebaran polutan di atmosfer, dengan tujuan memperkirakan konsentrasi pencemar di berbagai lokasi dan waktu. Terdapat beberapa jenis model kualitas udara yang dikembangkan berdasarkan pendekatan matematis dan fisis yang berbeda (Widyani, 2018). Setiap model memiliki karakteristik tersendiri tergantung pada skala studi, kompleksitas data, dan tujuan analisis. Model-model tersebut antara lain:

1. Model Empirik atau Statistik

Model ini didasarkan pada hubungan statistik antara data pengukuran polutan dan variabel lingkungan, seperti suhu, kelembapan, atau kepadatan lalu lintas. Model empirik biasanya digunakan untuk memperkirakan konsentrasi polutan pada wilayah yang memiliki keterbatasan data dengan memanfaatkan korelasi antar variabel. Contohnya adalah CAR-model,

yang digunakan untuk mengestimasi perubahan konsentrasi polutan akibat variasi kepadatan lalu lintas di suatu area (Ohorella, 2023).

2. Model Gaussian atau Plume Model

Model ini merupakan jenis yang paling banyak digunakan untuk memprediksi penyebaran polutan dari sumber titik seperti cerobong industri atau insinerator. Model Gaussian didasarkan pada teori dispersi turbulensi atmosfer yang mengikuti distribusi normal (*Gaussian distribution*), sehingga dapat menggambarkan sebaran polutan secara horizontal dan vertikal di udara. Model ini efektif digunakan untuk mengestimasi penyebaran polutan apabila data pengukuran lapangan terbatas (Ohorella, 2023). Model Gaussian mampu mengevaluasi dampak sumber pencemaran terhadap kualitas udara di kawasan lokal atau perkotaan. Keunggulan model ini adalah kemampuannya dalam mengolah data sumber emisi, kondisi meteorologi, dan sebaran spasial reseptor secara efisien, sehingga cocok diterapkan pada studi emisi SO₂ dari cerobong insinerator seperti di TPS3R Randu Alas.

3. Model Lagrangian

Model ini dikembangkan berdasarkan konsep mekanika partikel fluida yang dikemukakan oleh Joseph-Louis Lagrange (1736-1813). Dalam pendekatan ini, setiap partikel udara dianggap sebagai unit individu yang bergerak mengikuti lintasan (*trajectory*) di atmosfer, dengan posisi, kecepatan, dan percepatan yang berubah terhadap waktu. Model Lagrangian digunakan untuk menganalisis dispersi polutan di wilayah dengan topografi kompleks, seperti daerah pegunungan atau perkotaan dengan banyak penghalang bangunan. Namun, kelemahan utamanya adalah komputasi yang sangat intensif, karena memerlukan pelacakan ribuan partikel secara simultan untuk mendapatkan hasil yang akurat (Purnaditya, 2020).

4. Model Eulerian

Model ini berfokus pada perubahan konsentrasi polutan di titik-titik tetap dalam ruang, bukan pada pergerakan partikel individu. Konsep ini dikembangkan oleh Leonhard Euler (1707-1783) dan banyak digunakan

dalam simulasi numerik atmosfer modern. Dalam pendekatan Eulerian, udara dibagi menjadi beberapa sel atau grid spasial, dan model menghitung perubahan konsentrasi polutan akibat proses adveksi, difusi, serta reaksi kimia di setiap grid tersebut. Model ini sering diterapkan untuk skala regional hingga global, seperti dalam studi transportasi polutan lintas batas antarwilayah (Purnaditya, 2020).

Secara umum, dari keempat pendekatan tersebut, model Gaussian Plume merupakan yang paling sesuai untuk studi dispersi SO₂ dari insinerator di TPS3R Randu Alas. Hal ini karena sumber emisi berupa cerobong dapat direpresentasikan sebagai sumber titik tetap (*point source*), dan karakteristik sebarannya masih dalam skala lokal. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan model AERMOD yang merupakan salah satu turunan dari model Gaussian yang telah dikembangkan oleh U.S. *Environmental Protection Agency* (EPA) untuk memprediksi pola sebaran dan konsentrasi gas SO₂ di udara ambien di sekitar area penelitian.

2.5.3 Persamaan-persamaan Pemodelan

1. Persamaan dasar dispersi (Stockie, 2011)

Pemodelan dispersi polutan udara secara umum diturunkan dari persamaan adveksi-difusi tiga dimensi yang merepresentasikan perubahan konsentrasi polutan di atmosfer sebagai akibat proses transport dan pencampuran turbulen. Secara matematis, persamaan umum tersebut dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C\bar{u}) = \nabla \cdot (K\nabla C) + S$$

dimana:

- C = konsentrasi polutan di atmosfer (µg/m³)
- t = waktu (s)
- u = (u, v, w) = vektor kecepatan angin rata-rata pada sumbu x, y, z (m/s)
- K = tensor koefisien difusi turbulen, terdiri dari K_x, K_y, K_z (m²/s)
- S = laju sumber atau sink polutan (emisi atau serapan) (µg/m³·s), dapat bernilai negatif untuk sink

Persamaan ini menggambarkan bahwa perubahan konsentrasi polutan dipengaruhi oleh proses adveksi (transport oleh angin), difusi turbulen, serta kontribusi sumber emisi. Dalam kondisi steady-state, khususnya untuk interval rata-rata 1 jam sebagaimana umum digunakan dalam regulasi kualitas udara, suku waktu $\partial C / \partial t$ dapat diasumsikan mendekati nol. Penyederhanaan ini memungkinkan diperolehnya solusi analitik maupun numerik yang lebih sederhana.

Pendekatan steady-state sangat relevan untuk emisi kontinu dari cerobong insinerator, di mana proses adveksi oleh angin dominan dalam menentukan arah plume, sementara turbulensi atmosfer mengontrol pelebaran dan pengenceran konsentrasi SO₂ di sekitar TPS3R Randu Alas.

2. Model Gaussian (plume) (Turner, 2020)

Model Gaussian merupakan penyederhanaan dari persamaan adveksi-difusi dengan asumsi bahwa distribusi konsentrasi polutan pada arah melintang angin (y) dan vertikal (z) mengikuti distribusi normal (*Gaussian distribution*). Untuk sumber titik kontinu dalam kondisi *steady-state*, persamaan konsentrasi dinyatakan sebagai:

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

dengan:

- C (x, y, z) = konsentrasi polutan pada titik koordinat (x, y, z) (µg/m³)
- Q = laju emisi massa polutan dari sumber titik (g/s)
- U = kecepatan angin rata-rata pada ketinggian efektif cerobong (m/s)
- H = tinggi efektif *plume* (tinggi cerobong + *plume rise* akibat daya apung dan momentum) (m)
- σ_y = parameter dispersi horizontal (arah melintang angin), fungsi jarak x dan kelas stabilitas atmosfer (m)
- σ_z = parameter dispersi vertikal, fungsi jarak x dan kelas stabilitas atmosfer (m)

Model ini didasarkan pada beberapa asumsi utama, yaitu:

- 1) kecepatan dan arah angin relatif konstan dalam domain studi,

- 2) turbulensi atmosfer bersifat homogen,
- 3) terjadi refleksi sempurna di permukaan tanah (*ground reflection*),
- 4) reaksi kimia dan deposisi diabaikan pada jarak dekat sumber.

Keunggulan model Gaussian terletak pada efisiensi komputasi dan kesesuaiannya untuk skala lokal dengan sumber titik tetap. Namun demikian, model ini memiliki keterbatasan pada kondisi topografi kompleks dan angin yang sangat variabel. Model Gaussian menjadi dasar pengembangan AERMOD yang digunakan dalam penelitian ini.

3. Model Lagrangian (Stohl et al., 2005)

Pendekatan Lagrangian memodelkan dispersi dengan melacak pergerakan partikel polutan individual sepanjang lintasan (*trajectory*) di atmosfer. Secara matematis, pergerakan partikel dinyatakan sebagai:

$$dX = Vdt$$

$$dV = -aVdt + \sqrt{2a\sigma_v^2}dW$$

dimana:

- X = posisi partikel polutan dalam ruang 3D (m)
- V = kecepatan partikel polutan (m/s)
- a = koefisien redaman (drag) Lagrangian, merepresentasikan laju peluruhan autokorelasi kecepatan turbulen (1/s)
- σ_v = simpangan baku kecepatan turbulen (intensitas turbulensi) (m/s)
- dW = inkremen proses Wiener (komponen acak turbulensi, distribusi normal, mean = 0, variansi = dt) ($s^{1/2}$)
- dt = langkah waktu integrasi numerik (s)

Model ini memungkinkan representasi turbulensi atmosfer secara stokastik dan sangat fleksibel untuk sumber emisi kompleks atau topografi yang rumit. Namun, pendekatan ini membutuhkan data meteorologi tiga dimensi yang rinci serta kapasitas komputasi tinggi karena melibatkan pelacakan ribuan partikel. Dalam konteks penelitian ini yang berfokus pada satu sumber titik dengan skala lokal (<10 km), penggunaan model Lagrangian dinilai kurang efisien dan tidak proporsional terhadap kebutuhan analisis.

4. Model Eulerian (Stockie, 2011)

Model Eulerian menyelesaikan persamaan adveksi-difusi pada grid tetap dalam ruang dan waktu. Persamaan umumnya dituliskan sebagai:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (uC - K\nabla C) = S$$

dimana:

- C = konsentrasi polutan pada sel grid tertentu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- u = vektor kecepatan angin (m/s)
- K = koefisien difusi turbulen (skalar atau tensor tergantung implementasi) (m^2/s)
- S = suku sumber atau sink polutan (emisi, deposisi, reaksi kimia) ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$)

Dalam pendekatan ini, domain studi dibagi menjadi sel-sel grid, dan perubahan konsentrasi dihitung secara numerik menggunakan metode beda hingga (*finite difference*) atau volume hingga (*finite volume*).

Model Eulerian sangat sesuai untuk simulasi skala regional hingga global serta untuk studi multi-polutan dengan reaksi kimia kompleks. Namun, resolusi grid membatasi presisi dalam merepresentasikan sumber titik kecil seperti cerobong insinerator. Selain itu, kebutuhan data meteorologi numerik (misalnya dari WRF) dan beban komputasi yang tinggi menjadikan pendekatan ini kurang praktis untuk studi lokal berbasis satu sumber.

5. Justifikasi pemilihan model AERMOD

Berdasarkan karakteristik ketiga pendekatan utama tersebut, model berbasis Gaussian-turunan seperti AERMOD dipilih dalam penelitian ini karena paling sesuai dengan kondisi studi, yaitu:

- 1) Sumber emisi berupa sumber titik tetap (*point source*) berupa cerobong insinerator TPS3R.
- 2) Skala studi bersifat lokal (<10 km).
- 3) Data input yang tersedia terbatas pada parameter cerobong dan data meteorologi permukaan dari BMKG.

AERMOD merupakan pengembangan dari model Gaussian klasik yang telah disempurnakan dengan preprocessor AERMET (untuk

karakterisasi *Planetary Boundary Layer*) dan AERMAP (untuk pengaruh topografi). Dengan demikian, model ini mampu merepresentasikan kondisi atmosfer stabil dan tidak stabil secara lebih realistis dibanding Gaussian sederhana.

Dibandingkan model Lagrangian yang membutuhkan data meteorologi tiga dimensi dan komputasi tinggi, serta model Eulerian yang lebih cocok untuk skala regional, AERMOD menawarkan keseimbangan antara akurasi ilmiah, efisiensi komputasi, dan kesesuaian regulatif. Selain itu, AERMOD telah divalidasi oleh US EPA sebagai model regulasi standar, sehingga hasil simulasi konsentrasi SO₂ dapat langsung digunakan sebagai dasar analisis risiko kesehatan lingkungan dan evaluasi kepatuhan terhadap baku mutu udara ambien.

2.6. Model AERMOD

2.6.1 Struktur dan Komponen Model

AERMOD (*American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model*) merupakan model dispersi udara berbasis Gaussian plume yang dikembangkan melalui kolaborasi antara *American Meteorological Society* (AMS) dan *Environmental Protection Agency* (EPA) Amerika Serikat melalui AERMIC (*AMS/EPA Regulatory Model Improvement Committee*) (Nugroho & Sofyan, 2011). Sejak ditetapkan sebagai model regulasi standar oleh EPA pada tahun 2005, AERMOD menggantikan model sebelumnya yaitu ISCST3 (*Industrial Source Complex Short Term Model*) dan menjadi salah satu model utama yang digunakan dalam pemodelan dispersi polutan udara dari berbagai jenis sumber emisi, baik sumber titik, garis, maupun area (Rahmadani et al., 2024). Model ini dirancang untuk memprediksi konsentrasi polutan udara pada skala lokal dengan mempertimbangkan struktur turbulensi pada *Planetary Boundary Layer* (PBL) serta karakteristik sumber emisi dan kondisi topografi wilayah studi.

Secara umum, sistem AERMOD terdiri dari tiga komponen utama, yaitu AERMET, AERMAP, dan AERMOD itu sendiri. AERMET berfungsi sebagai meteorological preprocessor yang mengolah data meteorologi permukaan dan

udara atas untuk menghasilkan parameter atmosfer yang diperlukan dalam pemodelan dispersi, seperti friction velocity, mixing height, Monin-Obukhov length, dan parameter turbulensi lainnya yang menggambarkan kondisi lapisan batas atmosfer (ul Haq et al., 2019). Parameter tersebut digunakan untuk merepresentasikan dinamika atmosfer yang memengaruhi transport dan dispersi polutan di udara.

Komponen AERMAP berfungsi memproses data topografi wilayah studi, termasuk elevasi permukaan serta ketinggian relatif antara sumber emisi dan titik reseptor. Informasi topografi ini memungkinkan model untuk mempertimbangkan pengaruh medan, seperti bukit, lembah, dan variasi elevasi lainnya yang dapat memengaruhi pergerakan plume polutan di atmosfer. Sementara itu, modul utama AERMOD digunakan untuk menghitung konsentrasi polutan pada berbagai titik reseptor dan periode waktu tertentu berdasarkan data meteorologi, karakteristik sumber emisi, serta kondisi topografi yang telah diproses sebelumnya.

Selain ketiga komponen utama tersebut, proses pemodelan dalam AERMOD juga melibatkan beberapa jalur input (*pathways*), seperti *control pathway*, *source pathway*, *receptor pathway*, *meteorological pathway*, dan *output pathway*. Setiap jalur input tersebut berperan dalam menentukan parameter pemodelan, termasuk karakteristik sumber emisi, lokasi reseptor, kondisi meteorologi, serta data topografi wilayah studi. Integrasi berbagai parameter tersebut memungkinkan model untuk mensimulasikan distribusi konsentrasi polutan secara lebih komprehensif pada skala lokal hingga regional (Rzeszutek & Szulecka, 2021).

Struktur sistem yang terdiri dari berbagai komponen dan jalur input tersebut memungkinkan AERMOD menghasilkan simulasi dispersi polutan yang lebih representatif terhadap dinamika atmosfer sebenarnya, baik pada kondisi atmosfer stabil maupun tidak stabil. Model ini juga mampu mempertimbangkan fenomena *building downwash* serta pengaruh medan kompleks (*complex terrain effects*), sehingga dapat menggambarkan pola penyebaran polutan secara lebih realistis pada wilayah dengan variasi topografi maupun keberadaan bangunan di sekitar sumber emisi. Oleh karena itu, AERMOD banyak digunakan dalam kajian

pemodelan kualitas udara untuk menilai dampak emisi terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat.

2.6.2 Parameter Input dan Output Model

Untuk menjalankan AERMOD secara optimal, diperlukan data input utama yang mencakup data meteorologi, karakteristik topografi, dan parameter sumber emisi (Aprilia, 2023).

1. Data meteorologi diolah melalui modul AERMET dan meliputi arah dan kecepatan angin, suhu udara, kelembapan relatif, tekanan udara, tutupan awan, ketinggian awan (*ceiling height*), curah hujan, dan radiasi matahari, yang semuanya memengaruhi stabilitas atmosfer dan pergerakan *plume*.
2. Data topografi diperoleh melalui AERMAP untuk menghitung ketinggian relatif antara sumber dan reseptor, yang berperan penting dalam menentukan arah serta jarak sebaran polutan.
3. Data sumber emisi mencakup parameter fisik cerobong seperti tinggi cerobong (m), diameter (m), suhu gas buang ($^{\circ}\text{C}$), kecepatan aliran (m/s), dan laju alir massa polutan (g/s) (US EPA, 2004).

Semua parameter tersebut saling berpengaruh terhadap bentuk dan arah *plume*, termasuk bagaimana gas SO_2 terdifusi dan terdilusi di atmosfer. Model AERMOD kemudian menghasilkan output utama berupa konsentrasi polutan rata-rata dalam berbagai rentang waktu 1 jam, 8 jam, harian, hingga tahunan. Nilai-nilai ini dapat dibandingkan dengan baku mutu udara ambien nasional sebagaimana diatur dalam PP No. 22 Tahun 2021, untuk menentukan apakah konsentrasi SO_2 yang diprediksi masih dalam batas aman atau berpotensi menimbulkan dampak kesehatan masyarakat.

Keunggulan AERMOD dibandingkan model sejenis adalah presisinya yang tinggi dalam mengakomodasi variasi meteorologi lokal dan kompleksitas topografi, serta fleksibilitas penggunaan grid reseptor beraturan maupun tidak beraturan (Turner, 2020). Hal ini membuat AERMOD sangat efektif untuk digunakan dalam studi dispersi SO_2 dari cerobong insinerator di kawasan permukiman padat seperti TPS3R Randu Alas.

2.6.3 Studi Terdahulu Penggunaan AERMOD untuk SO₂

Model AERMOD telah banyak digunakan secara global untuk menganalisis sebaran polutan udara seperti PM₁₀, NO_x, SO₂, dan VOCs, baik dari sektor industri, transportasi, maupun pembakaran limbah). Dalam konteks sulfur dioksida (SO₂), AERMOD terbukti efektif menggambarkan distribusi spasial konsentrasi gas ini berdasarkan kondisi meteorologi lokal serta karakteristik sumber emisi spesifik.

Beberapa penelitian di Indonesia juga telah menerapkan AERMOD untuk berbagai skenario pengelolaan limbah dan pembakaran terbuka. Jawwad et al. (2023), misalnya, menggunakan AERMOD untuk memodelkan emisi dari TPA Klotok, Kediri, dan menemukan bahwa meskipun kadar CO pada sumber sangat tinggi, konsentrasinya menurun drastis dalam radius 100 meter pertama akibat proses dispersi atmosferik. Wicaksono (2024) menerapkan AERMOD di TPS Waru, Sidoarjo, untuk menganalisis emisi CO hasil pembakaran sampah dan berhasil menunjukkan bahwa hasil model dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas skenario mitigasi berdasarkan arah angin dan jarak reseptor.

Sementara itu, Assegaf (2017) menekankan bahwa model klasik seperti Pasquill-Gaussian masih relevan untuk pendekatan awal di wilayah dengan keterbatasan data meteorologi vertikal, namun validasi dan hasil yang lebih akurat tetap harus menggunakan AERMOD sebagai model regulasi standar. Penelitian internasional oleh Cau et al. (2025) juga membuktikan bahwa AERMOD dapat merepresentasikan perbedaan konsentrasi SO₂ antara kondisi atmosfer stabil dan tidak stabil secara akurat.

Meskipun telah banyak digunakan untuk skala industri besar, aplikasi AERMOD pada skala komunitas atau fasilitas pengelolaan sampah kecil seperti insinerator TPS3R masih jarang dilakukan di Indonesia. Oleh karena itu, penelitian ini berperan penting untuk mengisi kesenjangan ilmiah dalam penerapan model AERMOD untuk menilai risiko paparan SO₂ di wilayah permukiman padat. Selain itu, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi awal dalam penyusunan strategi pengendalian emisi dan perencanaan kebijakan lingkungan berbasis komunitas di tingkat daerah.

2.7. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Akibat Paparan SO₂

2.7.1 Konsep dan Tahapan Analisis Risiko

Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (*Environmental Health Risk Assessment/EHRA*) merupakan pendekatan ilmiah yang digunakan untuk menilai potensi dampak paparan polutan lingkungan terhadap kesehatan manusia (Harahap, 2022). Metode ini mengintegrasikan data toksikologi, informasi paparan, dan karakteristik populasi untuk mengukur tingkat risiko pada kelompok rentan maupun populasi umum. EHRA berfungsi sebagai alat bantu pengambilan keputusan berbasis bukti (*evidence-based policy tool*) dalam pengendalian pencemaran udara, khususnya pada paparan kronis terhadap gas berbahaya seperti sulfur dioksida (SO₂).

Konsep EHRA dikembangkan pertama kali di negara-negara maju seperti Amerika Serikat dan Eropa sebagai bagian dari sistem regulasi lingkungan, dan kemudian diadopsi oleh World Health Organization (WHO) serta Environmental Protection Agency (EPA). Di Indonesia, pendekatan ini telah diterapkan dalam penyusunan dokumen AMDAL dan kebijakan kesehatan lingkungan (Kristianto & Khamelda, 2018). Tujuan utama EHRA adalah untuk mengkuantifikasi risiko kesehatan manusia akibat paparan polutan serta memberikan dasar ilmiah bagi kebijakan mitigasi, termasuk dalam pengendalian sumber emisi, tata ruang, dan perlindungan masyarakat.

Secara umum, EHRA terdiri atas empat tahapan utama, yaitu (Siswati & Diyanah, 2017):

1. Identifikasi bahaya (*Hazard Identification*) - mengenali polutan yang berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan, seperti SO₂ yang diketahui bersifat iritatif terhadap sistem pernapasan.
2. Penilaian dosis-respons (*Dose-Response Assessment*) - menganalisis hubungan antara tingkat paparan dan kemungkinan efek kesehatan.
3. Penilaian paparan (*Exposure Assessment*) - menentukan tingkat paparan manusia berdasarkan konsentrasi polutan di udara ambien, durasi, frekuensi, serta jalur masuk ke tubuh.
4. Karakterisasi risiko (*Risk Characterization*) - menyatukan semua informasi untuk menghitung risiko kuantitatif, misalnya dalam bentuk

Hazard Quotient (HQ) atau nilai *Risk Quotient* (RQ) untuk efek non-karsinogenik.

2.7.2 Penilaian Risiko Non-Karsinogenik (RfC, Intake, RQ)

Dalam konteks gas SO₂, penilaian risiko non-karsinogenik berfokus pada efek kesehatan yang tidak menyebabkan kanker, seperti iritasi saluran pernapasan, penurunan fungsi paru, dan gangguan sistem kardiovaskular. Pendekatan ini digunakan untuk menilai seberapa besar potensi gangguan kesehatan yang mungkin timbul akibat paparan gas polutan di udara ambien. Analisis ini dilakukan dengan membandingkan tingkat paparan aktual yang diterima individu atau populasi terhadap nilai ambang batas aman (*Reference Concentration*/RfC) yang telah ditetapkan oleh lembaga berwenang (Kusumaningrum, 2023).

Nilai RfC (*Reference Concentration*) ditetapkan oleh US-EPA sebagai batas konsentrasi paparan inhalasi yang tidak menimbulkan efek merugikan bagi manusia selama masa hidupnya. Untuk SO₂, Nilai RfC yang digunakan untuk *risk agent* SO₂ adalah 0,026 mg/kg/hr yang diperoleh berdasarkan ketentuan dari EPA/NAAQS 1990 (Rahmawati, 2023). Nilai ini menjadi dasar perbandingan untuk menentukan apakah paparan di lingkungan penelitian, seperti di sekitar TPS3R Randu Alas, masih berada dalam kategori aman atau telah melewati ambang yang berisiko terhadap kesehatan.

Selain RfC, perhitungan *intake* digunakan untuk menggambarkan jumlah polutan yang masuk ke tubuh manusia per satuan waktu, baik melalui inhalasi langsung maupun paparan lingkungan. Nilai *intake* dihitung berdasarkan hasil konsentrasi polutan dari model AERMOD, dikombinasikan dengan parameter paparan seperti laju inhalasi, frekuensi dan durasi paparan, serta berat badan populasi. Komponen ini sangat penting untuk menentukan seberapa besar tingkat paparan aktual pada kelompok masyarakat di sekitar sumber emisi gas SO₂ dari insinerator.

Hasil dari penilaian intake kemudian digunakan untuk menghitung *Risk Quotient* (RQ), yaitu rasio antara tingkat paparan aktual (*intake*) dengan konsentrasi acuan aman (RfC). Nilai RQ menunjukkan sejauh mana paparan terhadap suatu zat dapat menimbulkan efek non-karsinogenik. Menurut

Tunsaringkarn et al. (2021), jika $RQ > 1$, maka kondisi tersebut dikategorikan sebagai “*adverse non-carcinogenic effects of concern*” atau berpotensi menimbulkan efek kesehatan yang merugikan. Sebaliknya, jika $RQ \leq 1$, maka tingkat paparan dianggap “*acceptable level*” atau masih berada dalam batas aman bagi manusia.

Pendekatan ini menjadi sangat penting diterapkan untuk gas SO_2 dari emisi insinerator TPS3R Randu Alas, mengingat jarak yang relatif dekat antara sumber pencemar dengan permukiman warga. Hasil perhitungan RQ dapat digunakan untuk menentukan zona aman dan tingkat risiko kesehatan masyarakat di sekitar area studi, sekaligus sebagai dasar penyusunan strategi mitigasi pengendalian emisi dan pengambilan keputusan berbasis risiko. Dengan demikian, analisis risiko non-karsinogenik berperan sebagai jembatan antara hasil pemodelan dispersi AERMOD dan penilaian kesehatan lingkungan berbasis bukti ilmiah.

2.8. Studi Penelitian Terdahulu

Penelitian terkait emisi gas buang, khususnya sulfur dioksida (SO_2), telah banyak dilakukan pada sektor pembakaran limbah, industri, dan pembangkit energi. SO_2 merupakan salah satu polutan utama yang berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara serta berdampak pada kesehatan manusia. Dalam pengoperasian insinerator, gas ini menjadi parameter penting karena dihasilkan langsung dari pembakaran bahan bersulfur. Sejumlah studi terdahulu telah mengkaji sebaran, konsentrasi, dan dampak kesehatan SO_2 menggunakan model atmosfer seperti AERMOD dan Meti-Lis, serta pendekatan eksperimental dan analisis risiko. Untuk memperkuat dasar teoritis penelitian ini, berikut disajikan rangkuman studi terdahulu yang relevan dengan analisis dispersi dan risiko paparan SO_2 pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Literatur Penelitian Terdahulu

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil
1	Novan Anugrah (2017)	<i>Analisa Dispersi Sulfur Dioksida (SO₂) dari Sumber Point Source Insinerator Rumah Sakit St. Antonius Menggunakan Model Metil-lis</i>	Pemodelan Metil-lis, validasi lapangan	Pemodelan dan pengukuran langsung menunjukkan nilai tertinggi SO ₂ sebesar 296,107 µg/Nm ³ , di bawah baku mutu. Validitas pemodelan tinggi (RMSPE <10%). Hal ini menegaskan bahwa SO ₂ menjadi indikator utama dalam evaluasi dampak insinerator medis karena karakteristiknya yang spesifik terhadap proses pembakaran sulfur dari limbah.
2	Ibnu Susanto Joyosemito, S. Shanti, & M. Azmi (2025)	<i>Evaluating Environmental and Public Health Risks of Medical Waste Incineration Using Air Dispersion Modeling in Indonesia</i>	Pemodelan Gaussian, simulasi dua skenario atmosfer	Lima parameter udara (NO ₂ , SO ₂ , CO, TSP, Pb) masih dalam batas aman, namun SO ₂ dan NO ₂ mendekati ambang batas BMUAN. Menunjukkan bahwa insinerator medis menghasilkan SO ₂ dalam jumlah signifikan yang harus terus dipantau sebagai parameter risiko kesehatan utama.
3	Nurfaiza (2024)	<i>Pengolahan Sampah Sayuran menggunakan Insinerator dan Wet Scrubber</i>	Pengujian eksperimental emisi SO ₂ dan NO ₂	Konsentrasi SO ₂ di insinerator 0,91 mg/Nm ³ menurun drastis pada sistem wet scrubber. Menunjukkan efektivitas penyaringan, namun juga menegaskan SO ₂ sebagai gas dominan hasil pembakaran limbah organik yang perlu dikendalikan secara spesifik.
4	Fajriyah Rafidah, Fitriyanti & Kurniati Abidin (2025)	<i>Analisis Gas Buang Insinerator dengan Filter Arang Aktif Berbasis Limbah Organik</i>	Pengukuran konsentrasi gas sebelum dan sesudah filtrasi	Konsentrasi SO ₂ menurun dari 473 ppm menjadi 56 ppm setelah filtrasi menggunakan arang aktif. Hal ini membuktikan SO ₂ sebagai komponen gas utama dan menegaskan perlunya teknologi mitigasi spesifik terhadapnya dalam sistem insinerator.

Lanjutan Tabel 2.1 Literatur Penelitian Terdahulu

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil
5	Zahra Eslami Doost et al. (2023)	<i>Dispersion of SO₂ Emissions in a Gas Refinery by AERMOD Modeling and Human Health Risk</i>	AERMOD 8.9.0, risk assessment	Konsentrasi maksimum SO ₂ 27.447 µg/m ³ (1 jam) dan 4.592 µg/m ³ (24 jam), melebihi standar WHO. HQ > 1 menandakan potensi risiko kesehatan signifikan. Ini memperkuat posisi SO ₂ sebagai polutan kritis dari emisi industri.
6	Shofi Nurhisana & Hamzah Hasyim (2022)	<i>Environmental Health Risk Assessment of Sulfur Dioxide (SO₂) at Workers Around Combined Cycle Power Plant (CCPP)</i>	<i>Environmental Health Risk Assessment (EHRA)</i>	Konsentrasi SO ₂ 0,085 mg/m ³ dengan RQ < 1 menunjukkan paparan masih aman, namun identifikasi efek kesehatan pernapasan memperkuat urgensi pemantauan SO ₂ pada fasilitas pembakaran bahan bakar fosil.
7	Edhi Sarwono et al. (2022)	<i>Dispersion of SO₂ and NO₂ Emitted by Auxiliary Boiler of PT KMI Methanol Industrial Using the Gaussian Plum Model AERMOD</i>	AERMOD, analisis meteorologi dan topografi	SO ₂ menunjukkan nilai tertinggi 6,2631 µg/m ³ (per jam) dan menurun seiring jarak. Hasil menunjukkan dispersi SO ₂ sangat dipengaruhi arah angin dan elevasi, dan perlu adanya kajian risiko di sekitar area industri.
8	Teerapattarada N. (2016)	<i>Health Risk Assessment of Industrial Emissions in Map Ta Phut, Thailand using AERMOD Modeling and GIS</i>	AERMOD + GIS	SO ₂ dan NO ₂ menunjukkan HI > 1 di daerah studi, dengan sebaran berbeda antara musim basah dan kering. Memperkuat pentingnya pemodelan SO ₂ dalam identifikasi risiko kesehatan lintas musim di kawasan industri.
9	Željko M. Ćirović et al. (2023)	<i>AERMOD Air Dispersion Modeling and Health Risks of Gas and Oil Fueled Heating Plant Emissions</i>	AERMOD + Analisis risiko	Paparan dari bahan bakar minyak menghasilkan risiko kesehatan lebih tinggi dibanding gas alam, dengan SO ₂ sebagai kontributor utama. Ini menunjukkan bahwa variasi bahan bakar berpengaruh pada level SO ₂ .

Lanjutan Tabel 2.1 Literatur Penelitian Terdahulu

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil
10	Mohsen Hesami Arani et al. (2021)	<i>Dispersion of NO₂ and SO₂ Pollutants in the Rolling Industry with AERMOD Model</i>	AERMOD, analisis bahan bakar	Konsentrasi SO ₂ mencapai 324 µg/m ³ pada jam tertentu, melebihi ambang batas 1 jam. Menunjukkan potensi bahaya dari pembakaran bahan bakar cair dan peran penting SO ₂ sebagai indikator emisi kritis di sektor industri berat.
11	Qahtan Thabit, Abdallah Nassour & Michael Nelles (2022)	<i>Flue Gas Composition and Treatment Potential of a Waste Incineration Plant</i>	Simulasi Epsilon 13.2 + perhitungan Excel	Emisi SO ₂ sebesar 890,2 mg/Nm ³ sebelum treatment, turun menjadi 44 mg/Nm ³ setelah Ca(OH) ₂ injection. Menunjukkan bahwa SO ₂ adalah salah satu polutan dominan dari pembakaran limbah padat dan menjadi fokus utama sistem pembersihan gas buang.
12	F. Bodénan & Ph. Deniard (2003)	<i>Characterization of Flue Gas Cleaning Residues from European Solid Waste Incinerators</i>	Analisis mineralogi & kimia	Studi menunjukkan kompetisi reaksi antara netralisasi HCl, SO ₂ , dan CO ₂ . SO ₂ berperan penting dalam pembentukan residu berbasis kalsium, menandakan dominasi keberadaannya pada sistem pembersihan gas insinerator Eropa.
13	Reshmi Das et al. (2015)	<i>Trace Element Composition of PM_{2,5} and PM₁₀ from Kolkata - a Heavily Polluted Indian Metropolis</i>	Analisis ICP-MS, faktor enrichment, faktor sumber	Sumber utama partikulat termasuk pembakaran batu bara dan <i>municipal waste incineration</i> . SO ₂ dikaitkan erat dengan pembentukan aerosol sekunder. Ini menegaskan kontribusi insinerator terhadap emisi SO ₂ di udara perkotaan padat penduduk.

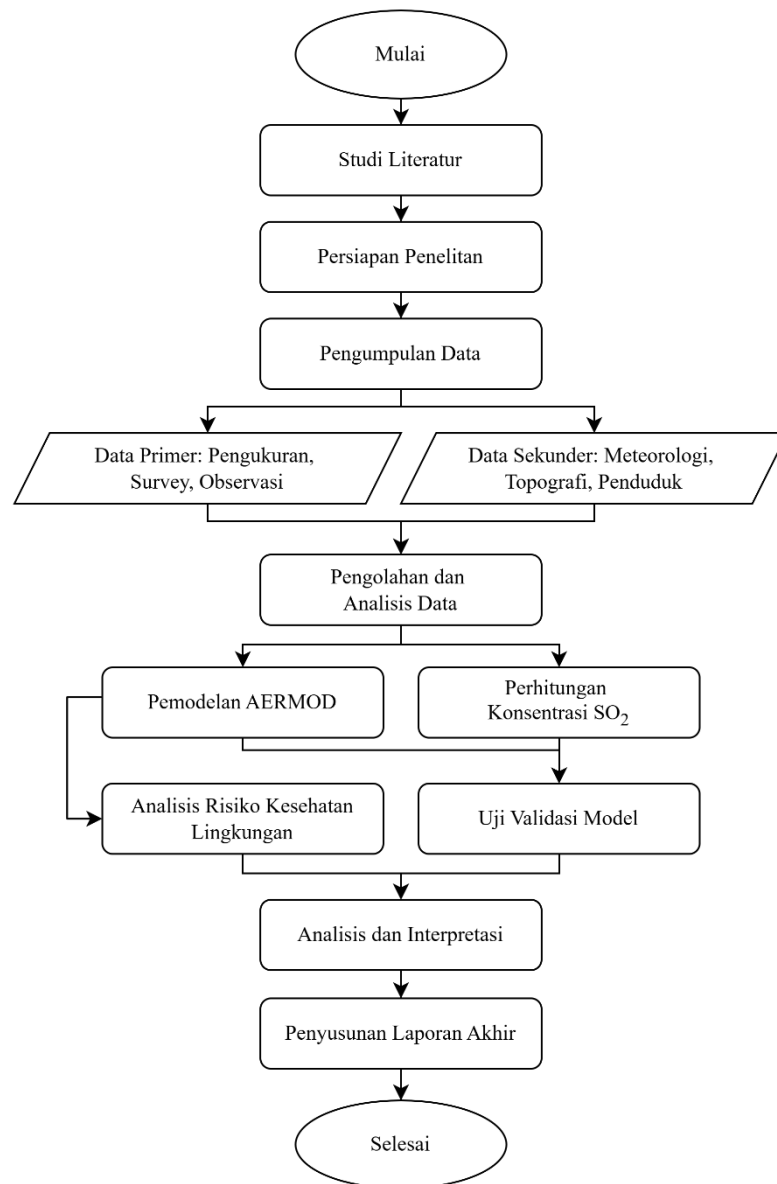
Berdasarkan uraian berbagai penelitian terdahulu di atas, dapat disimpulkan bahwa sulfur dioksida (SO_2) merupakan polutan udara yang memiliki peran penting dalam analisis kualitas udara, terutama di sekitar sumber emisi seperti insinerator, industri, dan pembangkit listrik. Sebagian besar penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi SO_2 dapat bervariasi tergantung pada bahan bakar, kondisi meteorologi, serta sistem pengendalian emisi yang digunakan. Pemodelan atmosfer seperti AERMOD dan Meti-Lis terbukti efektif dalam memprediksi pola sebaran gas ini serta membantu dalam evaluasi risiko kesehatan masyarakat. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada analisis dispersi dan potensi risiko paparan SO_2 dari sumber emisi insinerator dengan tujuan memberikan kontribusi ilmiah terhadap upaya pengendalian pencemaran udara yang lebih efektif.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis dispersi gas Sulfur Dioksida (SO_2) dari emisi insinerator di TPS3R Randu Alas, Kecamatan Ngaglik, Kabupaten Sleman, serta mengevaluasi potensi risiko kesehatannya terhadap masyarakat di sekitar kawasan tersebut. Secara umum, alur kegiatan penelitian ini dapat dijelaskan melalui diagram alir penelitian pada Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

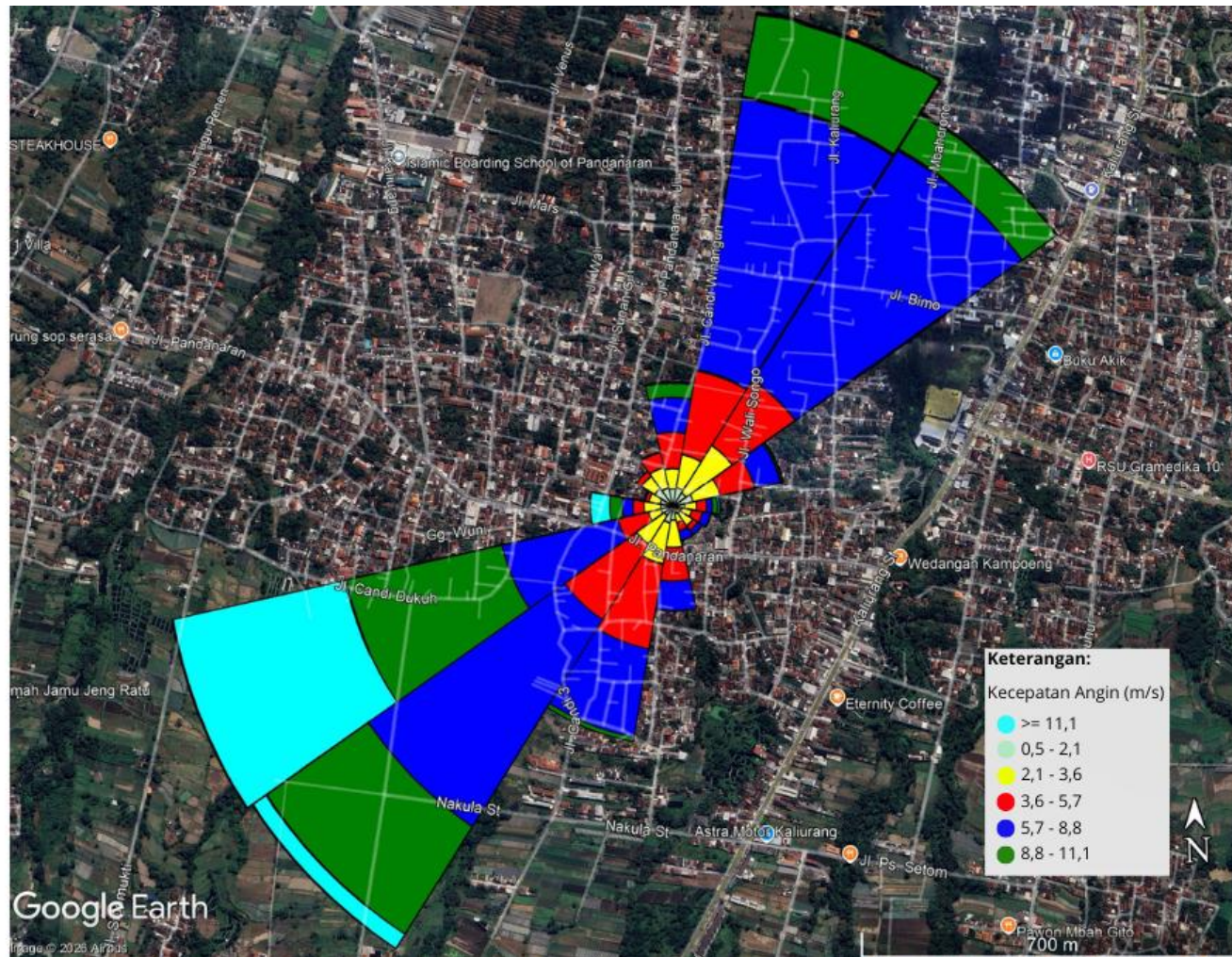
3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian

3.2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Tempat Pengolahan Sampah *Reduce-Reuse-Recycle* (TPS3R) Randu Alas, yang berlokasi di Kelurahan Sardonoarjo, Kecamatan Ngaglik, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. TPS3R ini merupakan fasilitas pengelolaan sampah berbasis masyarakat yang menggunakan insinerator sebagai metode pengolahan limbah padat. Proses pembakaran insinerator menghasilkan emisi gas buang, termasuk sulfur dioksida (SO₂), yang berpotensi memengaruhi kualitas udara ambien di sekitarnya.

Secara geografis, TPS3R Randu Alas berada di wilayah semi-perkotaan dengan kepadatan permukiman tinggi, di mana banyak rumah penduduk berjarak kurang dari 100 meter dari lokasi insinerator. Kondisi ini menuntut analisis dispersi polutan yang memperhatikan pola angin, topografi, dan aktivitas pembakaran sebagai faktor utama penyebaran SO₂ di atmosfer.

Penentuan titik pengambilan sampel udara ambien dilakukan dengan mempertimbangkan arah dan kecepatan angin hasil analisis mawar angin (*windrose*), jarak dari sumber emisi, serta kondisi lingkungan sekitar sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.2. Penentuan ini juga mengacu pada SNI 7119-7:2017 tentang metode pengukuran SO₂ udara ambien untuk memastikan keakuratan dan keterwakilan hasil pengamatan.



Gambar 3.2 Mawar Angin Lokasi Studi

Hasil analisis mawar angin periode tahun 2025 menunjukkan bahwa arah angin dominan datang dari sektor barat hingga barat daya dan bertiup menuju Utara-Timur Laut (N-NE) dari lokasi TPS3R Randu Alas, sehingga wilayah utara-timur laut berpotensi menjadi zona penerima konsentrasi tertinggi (*downwind*). Arah sekunder bertiup menuju sektor selatan-barat daya (S-SW) dengan frekuensi yang lebih kecil. Berdasarkan kondisi ini, titik-titik sampling ditempatkan pada arah *downwind* utama, *crosswind*, dan *upwind* sebagai kontrol udara latar belakang.

Selain pola angin dominan, secara geografis lokasi penelitian berada di lereng selatan Gunung Merapi, yang dapat dipengaruhi oleh angin lembah-gunung (*mountain-valley winds*). Pada siang hari, angin cenderung bergerak ke arah lereng (utara), sedangkan malam hari mengalir ke selatan (turun lembah) (Mohammad, 2021). Pola lokal ini dapat memengaruhi arah sebaran polutan secara temporal, sehingga pengambilan sampel dilakukan pada beberapa periode waktu untuk menangkap variasi harian tersebut.

Tabel 3.1 Lokasi Titik Sampling

Titik	Jarak	Fungsi	Titik Koordinat
T1 - TPS3R (sumber emisi)	0 m	Referensi sumber; mencatat kondisi operasi dan emisi dasar insinerator	7°42'6.01"S, 110°24'35.86"E
T2 - <i>Downwind</i> utama dekat	100 m	Menangkap puncak konsentrasi di permukiman hilir dekat	7°42'2.91"S, 110°24'34.42"E
T3 - <i>Downwind</i> utama jauh	200 m	Menggambarkan tren penurunan konsentrasi sepanjang jalur <i>plume</i> utama	7°41'59.42"S 110°24'36.39"E
T4 - <i>Crosswind</i>	150 m	Mengecek penyebaran lateral dan kondisi saat arah angin bergeser dari <i>plume</i> utama	7°42'7.40"S, 110°24'31.60"E
T5 - <i>Upwind</i>	250 m	Mewakili <i>baseline</i> latar belakang di sektor <i>upwind</i> yang umumnya tidak dilintasi <i>plume</i> dominan	7°42'10.98"S, 110°24'31.46"E

Penempatan lima titik sampling dilakukan untuk memetakan pola sebaran spasial konsentrasi SO_2 di sekitar sumber emisi. Berdasarkan hasil analisis mawar angin, arah dominan angin bergerak ke utara-timur laut relatif terhadap TPS3R, sehingga Titik 2 dan Titik 3 ditempatkan pada jalur sebaran utama (*downwind*) di sektor barat laut-utara (T2) dan utara-timur laut (T3). Titik 4 berada di sektor barat daya-selatan sebagai titik *crosswind* yang mewakili penyebaran lateral ketika arah angin bergeser, sedangkan Titik 5 yang terletak di selatan-barat daya berfungsi sebagai titik kontrol udara latar belakang (*upwind*). Titik 1 berperan sebagai lokasi sumber emisi dan digunakan untuk pencatatan kondisi operasional insinerator selama pengambilan sampel. Konfigurasi lima titik tersebut, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.3, diharapkan mampu merepresentasikan karakteristik dispersi SO_2 di area permukiman sekitar TPS3R Randu Alas.

3.2.2 Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Desember 2025 selama satu bulan, meliputi kegiatan pengambilan data primer, pengumpulan data sekunder, serta analisis dan pemodelan dispersi. Pemilihan bulan Desember mempertimbangkan kondisi musim penghujan ringan di Sleman dengan kelembapan tinggi dan arah angin relatif stabil, yang mendukung keandalan hasil pengukuran udara ambien.

Pengambilan sampel udara ambien dilakukan selama masa 1 bulan, dengan tiga sesi pengambilan setiap hari selama jam operasional insinerator menggunakan metode SNI 7119-7:2017, yaitu:

1. 07.00 - 08.00 WIB (periode pagi, awal operasi insinerator),
2. 11.00 - 12.00 WIB (periode siang, operasi stabil),
3. 17.00 - 18.00 WIB (periode sore, pasca-operasi).

Pengukuran emisi cerobong SO_2 dilakukan menggunakan Testo 350 oleh petugas laboratorium selama operasi stabil (sekitar pukul 10.30 WIB), dilakukan satu kali selama periode pengambilan data. Hasil pengukuran dibandingkan dengan baku mutu berdasarkan Permen LHK Nomor 70 Tahun 2016, sementara hasil udara ambien dibandingkan terhadap PP Nomor 22 Tahun 2021. Rangkaian

kegiatan ini diharapkan dapat menghasilkan data yang representatif untuk mendukung pemodelan dispersi SO₂ menggunakan AERMOD dan analisis risiko paparan di lingkungan sekitar TPS3R Randu Alas.

3.3. Pengumpulan Data

3.3.1 Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan sekunder yang dikumpulkan untuk mendukung proses pemodelan dispersi polutan serta analisis risiko kesehatan. Rincian jenis data, sumber, dan kegunaannya disajikan pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Jenis Data Yang Digunakan

Jenis Data	Sumber	Bentuk Data / Parameter	Kegunaan Dalam Penelitian
Data Primer	Pengukuran lapangan	Konsentrasi SO ₂ udara ambien pada 5 titik sampling (metode Impinger, SNI 7119-7:2017)	Menentukan kadar SO ₂ yang terdispersi ke lingkungan sekitar TPS3R
	Pengukuran cerobong insinerator (Testo 350 <i>Portable Gas Analyzer</i>)	Konsentrasi SO ₂ pada sumber emisi (ppm)	Digunakan sebagai <i>input source (emission rate)</i> dalam pemodelan AERMOD
	Observasi lapangan	Ketinggian cerobong, kondisi operasi insinerator, arah & kecepatan angin lokal, jarak ke permukiman	Mendukung validasi kondisi sumber dan interpretasi pola sebaran
Data Sekunder	ERA5 - <i>Copernicus Climate Data Store</i>	Data meteorologi: arah dan kecepatan angin, suhu, kelembapan, tekanan udara	Parameter meteorologis untuk pemodelan dispersi AERMOD
	Badan Informasi Geospasial (BIG)	Data topografi dan peta digital (DEM) wilayah	Menentukan elevasi permukaan dan kontur dalam model dispersi

Lanjutan Tabel 3.2 Jenis Data yang Digunakan

Jenis Data	Sumber	Bentuk Data / Parameter	Kegunaan Dalam Penelitian
Data Sekunder	PP No. 22 Tahun 2021 Lampiran VII	Baku mutu udara ambien nasional	Pembanding konsentrasi hasil model dengan standar kualitas udara
	US EPA, WHO, dan literatur ilmiah	Nilai <i>Reference Concentration</i> (RfC) dan parameter analisis risiko kesehatan	Digunakan dalam perhitungan risk quotient dan penilaian risiko kesehatan

3.3.2 Pengambilan Data Sampel

Pengambilan data lapangan dilakukan untuk memperoleh konsentrasi gas SO₂ baik pada sumber emisi maupun pada udara ambien di sekitar lokasi penelitian. Tahapan pengambilan data dilakukan melalui dua kegiatan utama, yaitu pengukuran emisi cerobong insinerator dan pengambilan sampel udara ambien pada titik-titik yang telah ditentukan.

Pengukuran konsentrasi SO₂ pada sumber emisi dilakukan terlebih dahulu di cerobong insinerator TPS3R Randu Alas dengan menggunakan Testo 350 *Portable Gas Analyzer*. Alat ini bekerja berdasarkan prinsip elektrokimia dan mampu mengukur konsentrasi gas secara langsung (*real-time*) dalam satuan ppm. Pengukuran dilakukan pada saat kondisi operasi insinerator berada dalam keadaan stabil, yaitu sekitar pukul 10.30 WIB. Pengukuran ini dilakukan satu kali selama periode penelitian dan hasilnya digunakan sebagai dasar penentuan konsentrasi sumber (*emission rate*) dalam proses pemodelan dispersi menggunakan AERMOD.

Setelah data sumber diperoleh, dilakukan pengambilan sampel udara ambien di lima titik sampling yang ditetapkan berdasarkan hasil analisis arah angin dominan dan jarak dari cerobong insinerator. Pengambilan sampel dilakukan menggunakan impinger dua tabung seri yang berisi larutan penyerap hidrogen peroksida (H₂O₂) 3% sebagai media penangkap gas SO₂, dengan mengacu pada SNI 7119-7:2017 tentang Metode Pengambilan Contoh Gas SO₂ di Udara Ambien. Pengambilan sampel dilakukan selama 1 jam pada tiga periode

waktu pengamatan, yaitu pukul 07.00-08.00, 11.00-12.00, dan 17.00-18.00 WIB. Pembagian waktu ini mempertimbangkan variasi aktivitas operasional insinerator serta perubahan kondisi meteorologi harian. Setiap titik sampling diambil sampelnya sebanyak empat kali dalam satu bulan penelitian (Desember 2025).

Peralatan yang digunakan meliputi impinger, pompa hisap udara dengan laju alir konstan (1 L/menit), *flow meter*, *stopwatch*, larutan penjerap, botol kaca amber, *coolbox* untuk penyimpanan dingin ($\pm 4^{\circ}\text{C}$), serta formulir pencatatan lapangan. Larutan hasil penyerapan segera dipindahkan ke wadah tertutup, diberi label sesuai titik dan waktu, kemudian disimpan dalam *coolbox* sebelum dibawa ke laboratorium untuk dianalisis.

3.3.3 Pengujian Laboratorium

Analisis laboratorium terhadap sampel udara ambien dilakukan di Laboratorium Kualitas Udara Jurusan Teknik Lingkungan, menggunakan metode pararosaniline sebagaimana tercantum dalam SNI 7119-7:2017. Prosedur pengujian meliputi:

1. Tahap Persiapan Sampel

Larutan hasil penyerapan gas SO_2 disaring dan dimasukkan ke dalam tabung reaksi. Sebelum dianalisis, dilakukan penyesuaian volume dengan larutan standar dan blanko untuk kalibrasi.

2. Tahap Analisis

Sampel direaksikan dengan larutan pararosaniline dan formaldehida dalam suasana asam untuk membentuk kompleks berwarna merah muda. Intensitas warna hasil reaksi diukur menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 550 nm.

3. Tahap Perhitungan Konsentrasi

Konsentrasi SO_2 dalam sampel udara dihitung menggunakan kurva kalibrasi dari larutan standar dan dikonversikan ke dalam satuan $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ berdasarkan volume udara yang dihisap.

Hasil uji laboratorium dibandingkan dengan baku mutu udara ambien nasional untuk menilai kesesuaian dengan ambang batas yang diperkenankan. Nilai tersebut selanjutnya digunakan sebagai input utama dalam pemodelan AERMOD dan analisis risiko kesehatan lingkungan.

3.4. Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk mengolah hasil pengukuran, pemodelan, dan pengujian laboratorium agar diperoleh gambaran kuantitatif mengenai konsentrasi SO₂ di udara ambien, sebaran spasial hasil dispersi, serta potensi risiko kesehatannya bagi masyarakat di sekitar TPS3R Randu Alas. Seluruh tahapan analisis dilakukan secara sistematis sebagaimana dijelaskan pada subbab berikut.

3.4.1 Perhitungan Konsentrasi SO₂ Hasil Pengujian

Hasil pengujian laboratorium dari sampel udara ambien dianalisis untuk memperoleh konsentrasi gas SO₂ (µg/Nm³). Analisis dilakukan dengan metode pararosaniline mengacu pada SNI 7119-7:2017. Konsentrasi SO₂ dihitung berdasarkan perbedaan intensitas warna hasil reaksi antara sampel dan blanko.

Dalam proses analisis, dilakukan koreksi terhadap nilai blanko untuk menghilangkan pengaruh kontaminasi atau kontribusi reagen yang tidak berasal dari sampel udara ambien. Nilai blanko diperoleh dari larutan yang diperlakukan sama dengan sampel, namun tanpa adanya paparan udara ambien. Oleh karena itu, jumlah SO₂ yang digunakan dalam perhitungan merupakan hasil pengurangan antara nilai pembacaan sampel dan nilai blanko yang diperoleh dari kurva kalibrasi. Konsentrasi SO₂ selanjutnya dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$C = \frac{a}{V} \times 1000 \quad (3.1)$$

Keterangan:

- C = konsentrasi SO₂ di udara (µg/Nm³)
- a = Jumlah SO₂ dari contoh uji setelah pengurangan blanko (µg)
- V = volume udara pada kondisi normal (L)
- 1000 = konversi liter (L) ke m³

Hasil perhitungan dari setiap titik sampling kemudian dibandingkan dengan Baku Mutu Udara Ambien Nasional (BMUAN) berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021, yaitu 150 µg/Nm³ (rata-rata 1 jam) untuk gas SO₂. Nilai ini digunakan sebagai dasar evaluasi kualitas udara di sekitar TPS3R serta sebagai input model AERMOD untuk simulasi penyebaran polutan.

3.4.2 Pemodelan Dispersi Menggunakan AERMOD

Pemodelan dispersi dilakukan untuk memperkirakan persebaran spasial konsentrasi SO₂ di udara ambien akibat aktivitas pembakaran pada insinerator TPS3R Randu Alas. Model yang digunakan adalah AERMOD (*American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model*), yang merupakan model gauss-plume berbasis kondisi permukaan dan profil atmosfer, sesuai dengan pedoman US EPA (2004).

1. Komponen Model

Tabel 3.3 Komponen Utama Model Yang Digunakan

Komponen	Fungsi	Data yang Digunakan
AERMET	Mengolah data meteorologi menjadi profil atmosfer	<i>Cloud Cover (tenth), Skin Temperature (°C), Relative Humidity (%), Surface Pressure (mbar), Wind Direction (°), Wind Speed (m/s), Ceiling Height (m), Total Precipitation (mm), Surface Net Solar Radiation (Wh/m²)</i>
AERMAP	Mengolah data topografi dan menentukan elevasi sumber & reseptor	Data DEMNAS atau serupa
AERMOD	Melakukan simulasi penyebaran polutan	Input dari AERMET, AERMAP, dan karakteristik emisi cerobong

2. Parameter Input Model

Tabel 3.4 Parameter Yang Digunakan Dalam Pemodelan AERMOD

Parameter	Sumber Data	Keterangan
Data Meteorologi	ERA5 (<i>Copernicus Climate Data Store</i>) → diolah dengan AERMET	<i>Cloud Cover, Skin Temperature, Relative Humidity, Surface Pressure, Wind Direction, Wind Speed, Ceiling Height, Total Precipitation, Surface Net Solar Radiation</i>
Data Sumber Emisi	Hasil uji emisi cerobong menggunakan Testo 350	Laju emisi (g/s), tinggi cerobong (m), suhu gas buang (°C), diameter cerobong (m), kecepatan aliran gas (m/s)

3. Output Model

Output pemodelan AERMOD menghasilkan gambaran sebaran konsentrasi SO₂ di sekitar TPS3R Randu Alas dalam bentuk peta kontur. Model memberikan dua hasil utama, yaitu konsentrasi maksimum 1 jam dan konsentrasi rata-rata harian (24 jam). Konsentrasi maksimum satu jam digunakan untuk melihat potensi paparan singkat yang dapat menimbulkan efek iritasi, sedangkan konsentrasi rata-rata harian digunakan untuk membandingkan dengan baku mutu udara ambien yang berlaku.

Pola sebaran konsentrasi mengikuti arah angin dominan, sehingga area yang berada pada sisi *downwind* dari TPS3R cenderung menerima paparan SO₂ lebih tinggi dibandingkan area *upwind* yang digunakan sebagai pembanding. Hasil pemodelan ini menjadi dasar untuk menentukan wilayah yang paling berisiko terpapar, serta digunakan dalam perhitungan dan evaluasi risiko kesehatan pada masyarakat sekitar.

3.4.3 Uji Validasi Model

Validasi hasil pemodelan AERMOD dilakukan dengan membandingkan konsentrasi prediksi model (C_p) dengan konsentrasi hasil pengukuran lapangan menggunakan impinger (C_o) pada periode dan lokasi yang sama. Proses validasi ini mengacu pada *performance measures* yang direkomendasikan dalam literatur evaluasi model kualitas udara oleh Chang & Hanna (2004), serta telah diaplikasikan dalam penelitian Rood (2014) untuk menilai kinerja AERMOD.

Penggunaan lebih dari satu indikator diperlukan karena masing-masing metrik memiliki fungsi yang berbeda, baik dalam menilai bias, variasi error, korelasi pola, maupun tingkat ketepatan prediksi terhadap observasi. Indikator validasi yang digunakan meliputi:

1. Fractional Bias (FB)

Menilai kecenderungan model melakukan *overpredict* atau *underpredict*.

$$FB = \frac{(\overline{C_o} - \overline{C_p})}{0,5 (\overline{C_o} + \overline{C_p})} \quad (3.2)$$

Nilai ideal FB adalah 0. $FB > 0$ menunjukkan model *underpredict*, sedangkan $FB < 0$ menunjukkan *overpredict*.

2. Normalized Mean Square Error (NMSE)

Mengukur besarnya variasi error relatif antara hasil model dan observasi.

$$NMSE = \frac{\overline{(C_o - C_P)^2}}{\overline{C_o} \cdot \overline{C_P}} \quad (3.3)$$

Nilai NMSE mendekati 0 menunjukkan kesesuaian yang lebih baik.

3. Geometric Mean Bias (MG)

Mengukur bias model dengan pendekatan logaritmik, lebih robust terhadap data yang memiliki rentang konsentrasi lebar

$$MG = \exp (\overline{\ln C_o} - \overline{\ln C_P}) \quad (3.5)$$

Nilai ideal MG adalah 1, dengan $MG > 1$ berarti *underpredict* dan $MG < 1$ berarti *overpredict*.

4. Geometric Variance (VG)

Menilai variabilitas rasio prediksi-observasi.

$$VG = \exp [(\overline{\ln C_o} - \overline{\ln C_P})^2] \quad (3.6)$$

Nilai ideal VG adalah 1. Semakin besar VG, semakin tinggi ketidakstabilan prediksi.

5. Koefisien Korelasi (R)

Mengukur kekuatan hubungan linear antara hasil model dan data observasi.

$$R = \frac{\overline{(C_o - \overline{C_o})(C_P - \overline{C_P})}}{\sigma_{C_o} \cdot \sigma_{C_P}} \quad (3.7)$$

Nilai ideal r adalah 1, yang menunjukkan korelasi sempurna.

6. Persentase dalam Faktor 2 (%FAC2)

Menunjukkan proporsi prediksi model yang masih berada dalam rentang 0,5-2 kali nilai observasi.

$$FAC2 = \frac{N_{0,5 \leq \frac{C_P}{C_o} \leq 2}}{N} \quad (3.8)$$

$$\%FAC2 = \frac{N_{0,5 \leq \frac{C_P}{C_o} \leq 2}}{N} \times 100\%$$

Semakin tinggi nilai %FAC2, semakin baik kinerja model. Nilai ideal adalah 1 atau 100%.

Dengan menghitung seluruh indikator di atas, evaluasi kinerja AERMOD menjadi lebih komprehensif. FB dan NMSE memberikan informasi mengenai bias rata-rata dan besarnya error, MG dan VG menggambarkan bias serta variabilitas dalam skala logaritmik, koefisien korelasi (r) menunjukkan kesesuaian pola

prediksi dengan observasi, sementara %FAC2 memberikan ukuran sederhana dan intuitif mengenai tingkat ketepatan model. Hasil validasi ini digunakan untuk menentukan apakah AERMOD cukup representatif dalam memodelkan dispersi SO₂ dari emisi insinerator di TPS3R Randu Alas.

3.4.4 Metode Penentuan Jumlah dan Karakteristik Responden

Penentuan jumlah responden dalam penelitian ini mengacu pada metode *Estimating a Population Proportion with Specified Absolute Precision* yang dikemukakan oleh Lwanga dan Lemeshow dalam buku *Sample Size Determination in Health Studies: A Practical Manual* (Lwanga & Lemeshow, 1991). Metode ini digunakan untuk menentukan ukuran sampel minimum yang diperlukan dalam penelitian yang bertujuan untuk mengestimasi proporsi suatu populasi dengan tingkat ketelitian tertentu.

Berdasarkan metode tersebut, ukuran sampel ditentukan dengan mempertimbangkan tingkat kepercayaan, asumsi proporsi populasi, serta tingkat presisi absolut yang diinginkan. Pada penelitian ini digunakan tingkat kepercayaan sebesar 95%, asumsi proporsi populasi (P) sebesar 0,1, serta tingkat presisi absolut (d) sebesar 0,1. Berdasarkan parameter tersebut dan mengacu pada Tabel 1 *Estimating a Population Proportion with Specified Absolute Precision* dalam Lwanga dan Lemeshow (1991), yang disajikan pada Lampiran 11, diperoleh kebutuhan minimum responden sebanyak 35 orang. Penetapan parameter tersebut juga mempertimbangkan kondisi lapangan, keterbatasan waktu penelitian, serta kendala dalam menjangkau masyarakat di sekitar lokasi penelitian.

Selanjutnya, penentuan karakteristik responden dalam penelitian ini dilakukan dengan mempertimbangkan distribusi kelompok usia masyarakat di wilayah Kelurahan Sardonoharjo. Responden dibagi ke dalam tiga kategori kelompok usia, yaitu anak-anak (0-18 tahun), dewasa (18-60 tahun), dan lansia (>60 tahun). Pembagian kategori usia ini dilakukan untuk merepresentasikan perbedaan karakteristik fisiologis serta potensi kerentanan terhadap paparan polutan udara pada kelompok usia yang berbeda. Kelompok anak-anak dan lansia umumnya dianggap sebagai kelompok rentan dalam kajian kesehatan lingkungan

karena memiliki sistem pernapasan yang lebih sensitif dibandingkan kelompok usia produktif.

Proporsi pembagian responden pada masing-masing kelompok usia mengacu pada data distribusi penduduk berdasarkan usia yang diperoleh dari sumber resmi *website* Kelurahan Sardonoarjo. Berdasarkan data tersebut, komposisi penduduk terdiri dari sekitar 16% anak-anak, 59% kelompok dewasa, dan 25% kelompok lansia. Oleh karena itu, jumlah responden dalam penelitian ini dibagi secara proporsional mengikuti distribusi tersebut, sehingga diperoleh 6 responden kategori anak-anak, 21 responden kategori dewasa, dan 9 responden kategori lansia, dengan total keseluruhan 36 responden. Pembagian secara proporsional ini dilakukan agar karakteristik responden dalam penelitian dapat merepresentasikan struktur demografis masyarakat di wilayah studi.

3.4.5 Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan

Berdasarkan pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan yang diterbitkan oleh Kementerian Kesehatan Republik Indonesia (2012), analisis risiko kesehatan dalam penelitian ini dilaksanakan melalui empat tahapan utama, yaitu identifikasi bahaya, analisis dosis-respons, analisis paparan, dan karakterisasi risiko. Setiap tahapan tersebut diuraikan secara sistematis pada subbagian berikut.

a. Identifikasi Bahaya

Identifikasi bahaya bertujuan untuk mengenali agen risiko, jenis, serta sifatnya yang dapat memicu gangguan kesehatan pada manusia. Dalam konteks penelitian ini, agen risiko utama yang dianalisis adalah SO₂ yang berasal dari emisi insinerator.

b. Analisis Dosis-Respon

Tahapan ini bertujuan untuk menetapkan nilai konsentrasi acuan (*Reference Concentration*, RfC) yang berfungsi sebagai batas aman tingkat paparan terhadap efek non-karsinogenik suatu zat pencemar. Untuk paparan melalui inhalasi, nilai RfC untuk SO₂ ditetapkan sebesar 0,026 mg/kg/hari (Rahmawati, 2023).

c. Analisis Paparan

Analisis pajanan dilakukan untuk menghitung besar intake atau asupan harian polutan yang masuk ke dalam tubuh melalui inhalasi. Nilai intake diperoleh dengan rumus sebagai berikut:

$$Ink = \frac{C \times R \times t_E \times f_E \times D_t}{W_b \times t_{avg}} \quad (3.9)$$

Keterangan:

- Ink = Intake (mg/kg/hari)
- C = Nilai konsentrasi SO₂ (mg/m³)
- R = Laju inhalasi udara (0,83 m³/jam)
- t_E = Waktu pajanan (x jam/hari)
- f_E = Frekuensi pajanan (350 hari/tahun)
- D_t = Durasi pajanan (x tahun)
- W_b = Berat badan populasi (x kg)
- t_{avg} = Periode waktu rata-rata (x hari)

d. Karakterisasi Risiko

Karakterisasi risiko merupakan tahap untuk menilai sejauh mana pajanan tersebut berpotensi menimbulkan dampak kesehatan. Nilai risiko ini dinyatakan dalam bentuk *Risk Quotient* (RQ) yang dihitung dengan persamaan berikut:

$$RQ = \frac{Ink}{RfC} \quad (3.10)$$

Keterangan:

- RQ = Nilai karakteristik risiko
- Ink = Intake (mg/kg/hari)
- RfC = Konsentrasi referensi (mg/kg/hari)

Berdasarkan pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan tersebut, interpretasi nilai *Risk Quotient* (RQ) dalam penelitian ini mengacu pada kriteria penilaian risiko kesehatan non-karsinogenik sebagai berikut:

- Jika $RQ > 1$, menunjukkan adanya potensi risiko kesehatan sehingga diperlukan tindakan pengendalian.
- Jika $RQ \leq 1$, berarti risiko masih dalam batas aman, tetapi tetap perlu dijaga agar nilainya tidak melebihi ambang batas.

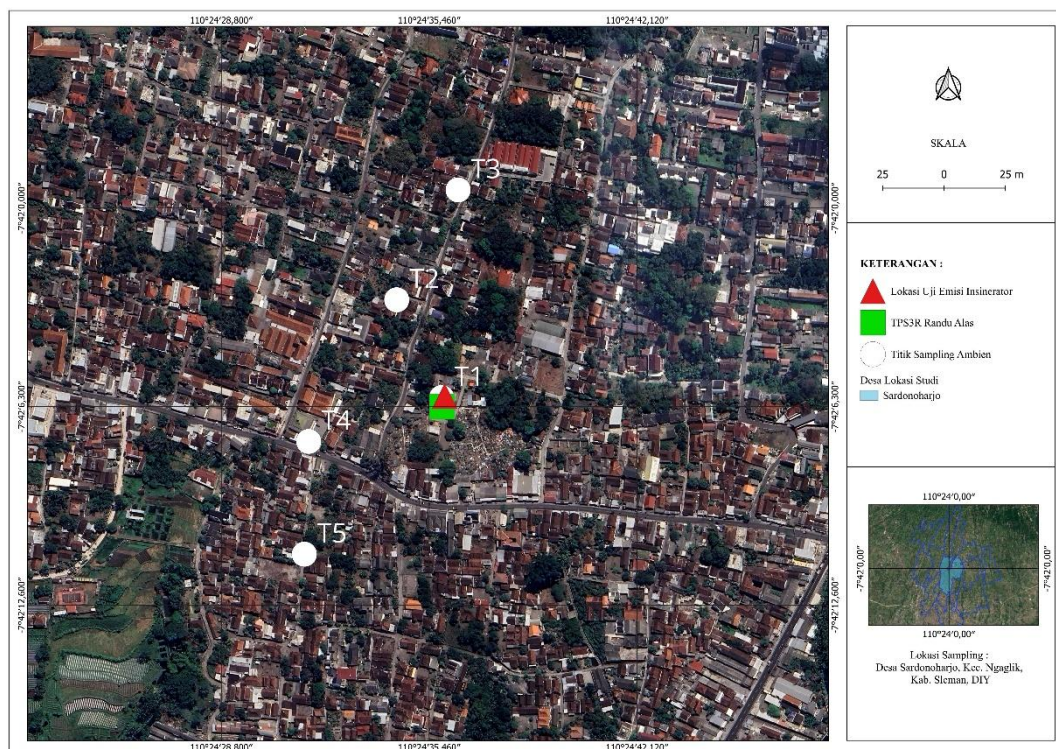
Dengan tahapan ini, dapat diperoleh gambaran potensi risiko kesehatan masyarakat akibat paparan SO₂ dari emisi insinerator, sehingga menjadi dasar pertimbangan untuk upaya mitigasi maupun rekomendasi pengelolaan lingkungan.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Gambaran Umum Lokasi Penelitian dan Potensi Paparan

TPS3R Randu Alas terletak di kawasan permukiman dengan kepadatan hunian yang relatif tinggi, sehingga jarak antara sumber emisi insinerator dan area hunian tergolong dekat. Kondisi ini menunjukkan bahwa masyarakat sekitar berada dalam radius pengaruh langsung terhadap emisi yang dihasilkan selama operasional insinerator berlangsung. Kedekatan spasial tersebut berpotensi meningkatkan peluang terjadinya paparan, terutama pada periode operasional aktif.



Gambar 4.1 Peta Lokasi Penelitian dan Titik Sampling Udara Ambien

Berdasarkan distribusi spasial titik sampling yang ditunjukkan pada Gambar 4.1, terlihat bahwa area permukiman mengelilingi sumber emisi pada berbagai arah. Pola ini mengindikasikan bahwa potensi paparan tidak terbatas pada satu sektor tertentu, melainkan dapat terjadi mengikuti arah pergerakan angin dominan pada waktu operasional. Dengan demikian, dinamika meteorologi menjadi faktor penting dalam menentukan variasi konsentrasi SO_2 yang terukur di masing-masing titik.

Secara umum, lokasi penelitian menunjukkan karakteristik kombinasi bangunan padat, vegetasi, serta jaringan jalan lokal. Keberadaan bangunan dan hambatan fisik lainnya dapat memengaruhi pola aliran udara di dekat permukaan, sehingga berpotensi menyebabkan variasi konsentrasi lokal yang berbeda dari pola dispersi ideal. Kondisi ini menjadi relevan dalam menginterpretasikan hasil pengukuran dan simulasi dispersi pada subbab berikutnya.

4.2. Hasil Pengukuran Konsentrasi SO₂ di Udara Ambien

Pengukuran konsentrasi sulfur dioksida (SO₂) pada udara ambien dilakukan di lima titik yang tersebar di sekitar TPS3R Randu Alas guna memperoleh gambaran kondisi kualitas udara aktual pada area yang berpotensi terdampak emisi insinerator. Pengambilan sampel dilaksanakan pada tiga periode waktu, yaitu pagi, siang, dan sore, untuk mengidentifikasi kemungkinan variasi konsentrasi akibat perubahan aktivitas operasional maupun faktor meteorologis. Acuan baku mutu yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, dengan batas konsentrasi SO₂ sebesar 150 µg/m³ untuk rata-rata waktu 1 jam.

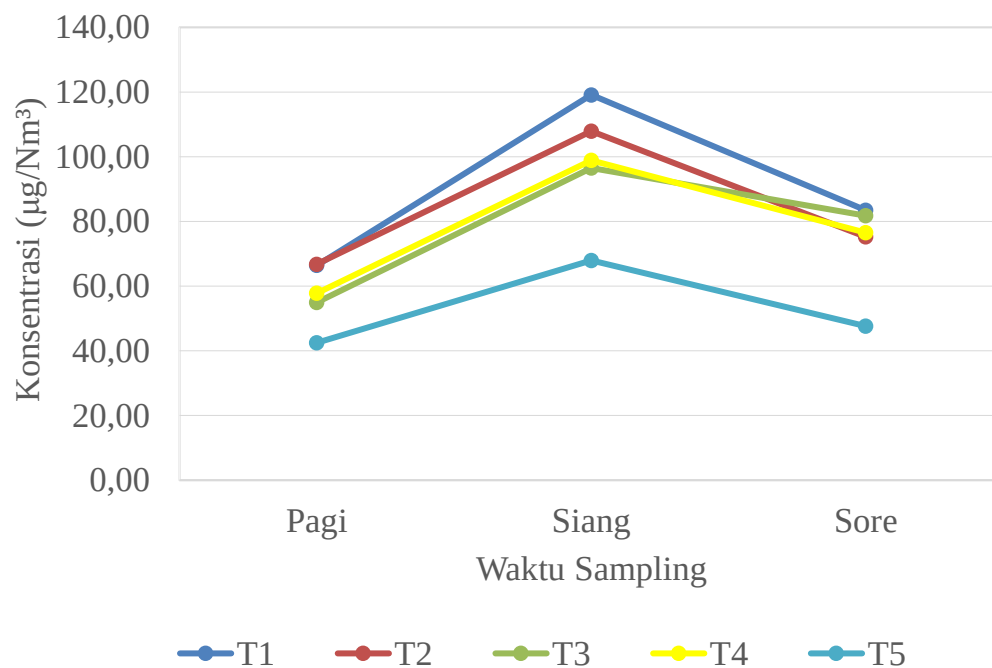
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Konsentrasi SO₂ pada Udara Ambien di Sekitar TPS3R Randu Alas

No	Lokasi	Pagi (µg/m ³)	Siang (µg/m ³)	Sore (µg/m ³)	Rerata (µg/m ³)	Baku Mutu (µg/m ³)
1	T1	66,4	119,14	83,47	89,67	150
2	T2	66,78	107,91	75,23	83,31	150
3	T3	54,96	96,52	81,79	77,76	150
4	T4	57,8	98,88	76,49	77,72	150
5	T5	42,49	67,95	47,67	52,7	150
Rerata		57,69	98,08	72,93	76,23	150

Berdasarkan hasil pengukuran yang disajikan pada Tabel 4.1, konsentrasi SO₂ pada seluruh titik sampling masih berada di bawah baku mutu yang ditetapkan. Konsentrasi rata-rata tertinggi terukur pada Titik 1 sebesar 89,67 µg/m³, sedangkan nilai terendah berada pada Titik 5 sebesar 52,70 µg/m³. Perbedaan konsentrasi ini menunjukkan adanya pengaruh jarak terhadap sumber

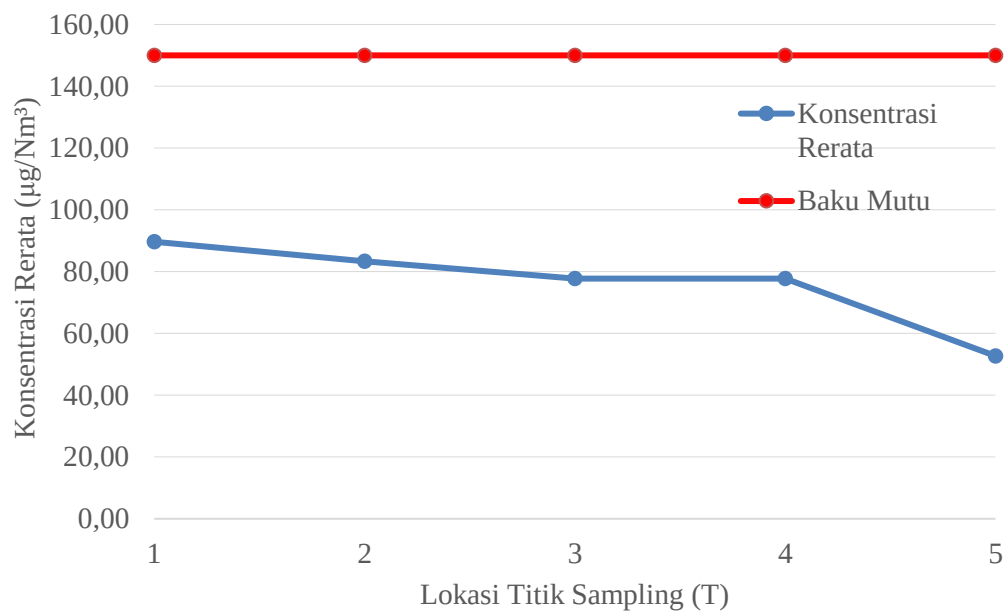
emisi, di mana lokasi yang lebih dekat dengan insinerator cenderung menerima paparan polutan yang lebih tinggi dibandingkan lokasi yang berada lebih jauh.

Jika ditinjau berdasarkan waktu sampling, konsentrasi tertinggi secara umum terjadi pada periode siang hari dengan rata-rata sebesar $98,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan konsentrasi terendah terjadi pada pagi hari sebesar $57,69 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.2, seluruh titik mengalami peningkatan konsentrasi pada siang hari sebelum kembali menurun pada sore hari. Pola ini mengindikasikan adanya keterkaitan antara aktivitas operasional insinerator serta kondisi atmosfer terhadap distribusi polutan di udara ambien.



Gambar 4.2 Grafik Konsentrasi SO_2 Berdasarkan Waktu Pengukuran di Setiap Titik Sampling

Selain itu, Gambar 4.3 memperlihatkan bahwa seluruh konsentrasi rata-rata masih berada di bawah garis baku mutu, meskipun beberapa titik menunjukkan nilai yang mendekati lebih dari setengah ambang batas. Kondisi tersebut menandakan bahwa emisi dari insinerator tetap memberikan kontribusi terhadap kualitas udara di sekitarnya, sehingga keberadaan polutan perlu tetap diwaspadai terutama bagi masyarakat yang beraktivitas dalam radius terdekat dari sumber emisi.



Gambar 4.3 Perbandingan Konsentrasi Rata-rata SO₂ terhadap Baku Mutu Udara Ambien

Meskipun tidak ditemukan konsentrasi yang melampaui baku mutu, keberadaan SO₂ di udara tetap berpotensi menimbulkan risiko apabila paparan terjadi secara berulang dalam jangka waktu panjang. Oleh karena itu, hasil pengukuran ini tidak hanya berfungsi sebagai gambaran kondisi eksisting kualitas udara, tetapi juga sebagai dasar dalam mengevaluasi kemampuan model dispersi dalam merepresentasikan kondisi lapangan. Data observasi ini selanjutnya digunakan sebagai pembanding dalam proses validasi model AERMOD guna memastikan tingkat keandalan hasil pemodelan sebelum digunakan dalam analisis risiko kesehatan lingkungan.

4.3. Hasil Uji Emisi SO₂ dan Karakteristik Sumber Emisi

Sebagaimana telah diuraikan pada Subbab 4.1, insinerator TPS3R Randu Alas merupakan sumber titik utama emisi udara di kawasan penelitian. Oleh karena itu, pengukuran emisi cerobong dilakukan untuk memperoleh besaran kuantitatif SO₂ yang dilepaskan ke atmosfer sebagai dasar dalam pemodelan dispersi dan analisis risiko kesehatan. Pengukuran dilakukan menggunakan *gas analyzer portable* Testo 350 pada kondisi operasional normal pembakaran sampah residu dengan bantuan kayu bakar, biosolar subsidi, dan blower.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi SO₂ terukur sebesar 3,875 ppm dengan kadar O₂ aktual sebesar 20,735%. Konsentrasi SO₂ kemudian dikonversi ke kondisi normal (25°C dan 1 atm) dan dikoreksi terhadap kadar O₂ acuan 11% sesuai Permen LHK No. 70 Tahun 2016 tentang baku mutu emisi pengolahan sampah secara termal. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh konsentrasi SO₂ terkoreksi sebesar 383,21 mg/Nm³ sehingga melebihi baku mutu emisi SO₂ untuk insinerator sebesar 210 mg/Nm³. Ringkasan hasil uji emisi insinerator dapat dilihat sebagaimana pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Ringkasan Hasil Uji Emisi SO₂ Insinerator

Parameter	Nilai	Keterangan
Konsentrasi SO ₂ terukur	3,875 ppm	Hasil pengukuran <i>gas analyzer</i>
Konsentrasi SO ₂ sebelum koreksi O ₂	10,14 mg/Nm ³	Hasil konversi ppm ke mg/Nm ³
O ₂ aktual	20,735 %	Hasil pengukuran kadar oksigen cerobong
Konsentrasi SO ₂ terkoreksi	383,21 mg/Nm ³	Hasil koreksi terhadap O ₂ acuan 11%
Baku mutu SO ₂	210 mg/Nm ³	Permen LHK No. 70 Tahun 2016
Status	Tidak memenuhi	Konsentrasi melebihi baku mutu
Debit gas buang	0,314 Nm ³ /s	Luas penampang × kecepatan gas
Beban emisi	0,12 g/s	Konsentrasi terkoreksi × debit gas

Konsentrasi SO₂ sebelum koreksi sebesar 10,14 mg/Nm³ diperoleh dari konversi konsentrasi ppm ke satuan mg/Nm³ menggunakan kondisi standar 25°C dan tekanan 1 atm. Nilai tersebut mengalami peningkatan signifikan setelah dilakukan koreksi terhadap O₂ acuan 11% karena kadar O₂ aktual yang terukur sangat tinggi dan mendekati konsentrasi oksigen atmosfer. Berdasarkan persamaan koreksi emisi, selisih yang sangat kecil antara kadar O₂ atmosfer (21%) dan O₂ aktual menyebabkan faktor koreksi meningkat secara drastis sehingga konsentrasi emisi terkoreksi menjadi jauh lebih besar.

Kondisi kadar O₂ aktual sebesar 20,735% menunjukkan adanya *excess air* yang tinggi pada sistem pembakaran insinerator. Penggunaan blower secara kontinu diduga menyebabkan suplai udara berlebih sehingga konsentrasi oksigen pada gas buang meningkat dan proses pembakaran menjadi kurang stabil. Selain itu, tingginya kadar O₂ juga dapat mengindikasikan adanya pencampuran udara ambien ke dalam aliran gas buang selama proses pengukuran berlangsung.

Berdasarkan hasil observasi lapangan, jumlah sampah yang dibakar mencapai sekitar 700 kg/hari dengan karakteristik dominan berupa residu sampah rumah tangga seperti plastik campuran, kemasan multilayer, kertas tercemar, dan material *non-recyclable* lainnya. Sebelum dibakar, sampah anorganik yang masih memiliki nilai ekonomis dipilah untuk dijual kembali, sedangkan residu yang tersisa langsung dimasukkan ke insinerator. Proses pembakaran menggunakan biosolar subsidi sebagai bahan bakar pemicu api dengan konsumsi sekitar 10 liter per hari tergantung kondisi sampah yang dibakar, terutama pada saat kadar air sampah tinggi atau material sulit terbakar.

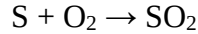
Untuk memahami potensi pembentukan SO₂ dari proses pembakaran, dilakukan pendekatan neraca massa sulfur berdasarkan karakteristik sampah dan bahan bakar yang digunakan. Kandungan sulfur *municipal solid waste* (MSW) dalam penelitian ini mengacu pada Cheng et al. (2023) sebesar 0,71%, sedangkan kandungan sulfur biosolar subsidi mengacu pada Fatmawati et al. (2023) sebesar 3.500 ppm atau setara 0,35% m/m. Pendekatan neraca massa sulfur digunakan untuk memperkirakan jumlah sulfur yang masuk ke sistem pembakaran dan potensi pembentukan SO₂ secara teoritis berdasarkan komposisi sulfur bahan bakar dan sampah yang dibakar.

Hasil estimasi neraca massa sulfur dan potensi pembentukan SO₂ dapat dilihat sebagaimana pada Tabel 4.3. Berdasarkan hasil perhitungan, sulfur yang berasal dari sampah mencapai sekitar 4,97 kg/hari, sedangkan sulfur dari biosolar sekitar 0,0294 kg/hari. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sumber sulfur terbesar diperkirakan berasal dari residu sampah yang dibakar, terutama plastik campuran, kemasan sintesis, dan material *non-recyclable* lain yang masih mengandung senyawa sulfur dan aditif berbasis sulfur.

Tabel 4.3 Estimasi Neraca Massa Sulfur dan Potensi Pembentukan SO₂

Parameter	Nilai	Keterangan
Massa sampah dibakar	700 kg/hari	Data operasional pembakaran
Kandungan sulfur sampah	0,71 %	Kandungan sulfur MSW (Cheng et al., 2023)
Sulfur dari sampah	4,97 kg/hari	Massa sampah × kandungan sulfur
Konsumsi biosolar	10 L/hari	Estimasi konsumsi harian biosolar
Kandungan sulfur biosolar	0,35 %	Setara 3.500 ppm sulfur
Sulfur dari biosolar	0,0294 kg/hari	Massa biosolar × kandungan sulfur
Total sulfur input	5,00 kg/hari	Total sulfur dari sampah dan biosolar
Potensi teoritis SO ₂	10,00 kg SO ₂ /hari	Konversi stoikiometri S menjadi SO ₂

Sulfur yang terkandung dalam sampah dan bahan bakar akan teroksidasi selama proses pembakaran melalui reaksi:



Berdasarkan pendekatan stoikiometri, total sulfur input sebesar 5,00 kg/hari berpotensi menghasilkan sekitar 10,00 kg SO₂/hari apabila seluruh sulfur teroksidasi sempurna menjadi sulfur dioksida. Nilai tersebut relatif mendekati hasil perhitungan emisi output berdasarkan beban emisi cerobong sebesar 0,12 g/s atau setara sekitar 10,39 kg SO₂/hari pada asumsi operasional 24 jam. Kedekatan nilai tersebut menunjukkan bahwa pendekatan neraca massa sulfur yang digunakan telah cukup merepresentasikan potensi pembentukan SO₂ dari proses pembakaran residu sampah di TPS3R Randu Alas.

Meskipun demikian, hasil emisi output masih menunjukkan nilai yang sedikit lebih tinggi dibandingkan estimasi sulfur input. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh perbedaan basis perhitungan yang digunakan antara neraca massa sulfur dan hasil emisi terkoreksi. Perhitungan sulfur input dilakukan menggunakan pendekatan stoikiometri berdasarkan massa sulfur aktual yang masuk ke sistem pembakaran, sedangkan hasil emisi output diperoleh dari konsentrasi gas buang yang telah dikoreksi terhadap O₂ acuan 11% sesuai

regulasi. Pada kondisi kadar O₂ aktual yang sangat tinggi sebesar 20,735%, faktor koreksi emisi meningkat secara signifikan sehingga konsentrasi emisi terkoreksi menjadi jauh lebih besar dibandingkan konsentrasi awal sebelum koreksi.

Selain memengaruhi hasil koreksi emisi, tingginya kadar O₂ aktual juga menunjukkan adanya *excess air* yang tinggi pada proses pembakaran. Suplai udara berlebih dari penggunaan blower menyebabkan konsentrasi oksigen pada gas buang mendekati kondisi atmosfer sehingga pembakaran menjadi kurang stabil dan efisiensi termal menurun. Kondisi tersebut menyebabkan karakteristik emisi SO₂ sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional insinerator, terutama suplai udara, temperatur pembakaran, serta karakteristik residu sampah yang dibakar.

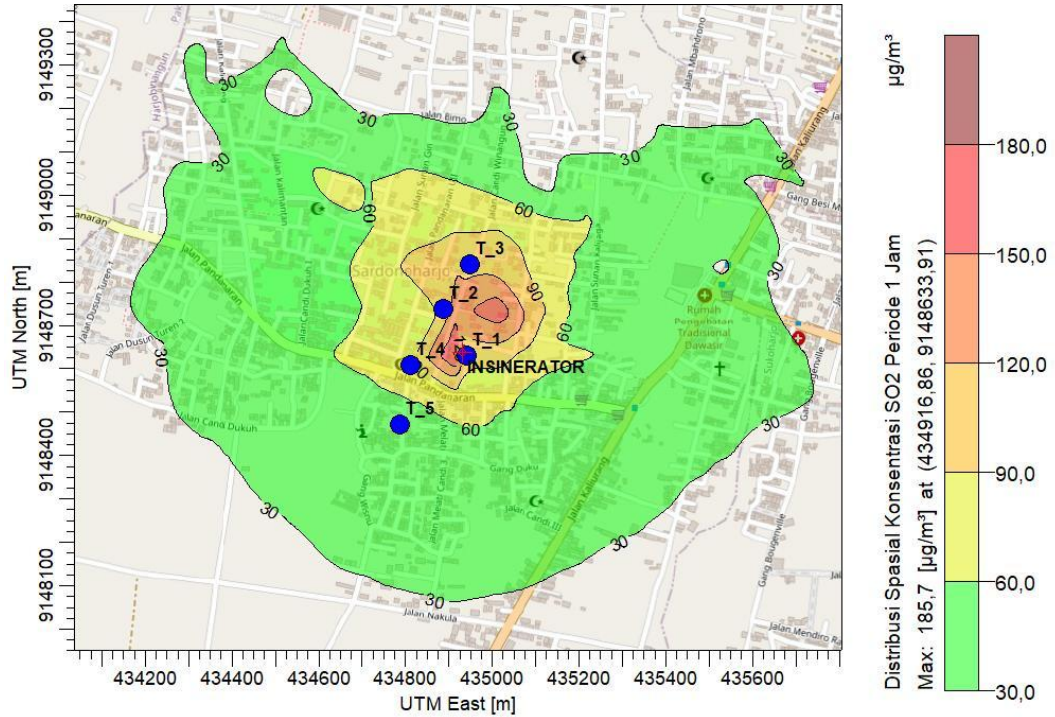
Karakteristik cerobong juga memengaruhi potensi dampak emisi terhadap lingkungan sekitar. Tinggi cerobong sekitar 5 meter dengan kecepatan gas buang 1,19 m/s menghasilkan *plume rise* yang relatif rendah sehingga gas buang lebih cepat bercampur dengan udara pada lapisan permukaan. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan konsentrasi ambien di sekitar sumber sebelum mengalami proses pengenceran atmosferik lebih lanjut.

Secara keseluruhan, tingginya emisi SO₂ pada insinerator TPS3R Randu Alas dipengaruhi oleh interaksi antara kandungan sulfur pada residu sampah, penggunaan biosolar bersulfur sebagai bahan bakar pemicu, serta kondisi operasional pembakaran yang menghasilkan kadar O₂ aktual sangat tinggi. Nilai O₂ aktual yang mendekati konsentrasi oksigen atmosfer menyebabkan faktor koreksi emisi meningkat secara signifikan sehingga konsentrasi SO₂ terkoreksi menjadi melebihi baku mutu emisi yang berlaku. Beban emisi sebesar 0,12 g/s selanjutnya digunakan sebagai parameter masukan (*emission rate*) dalam pemodelan dispersi AERMOD untuk mengevaluasi pola sebaran polutan dan potensi paparan terhadap masyarakat sekitar.

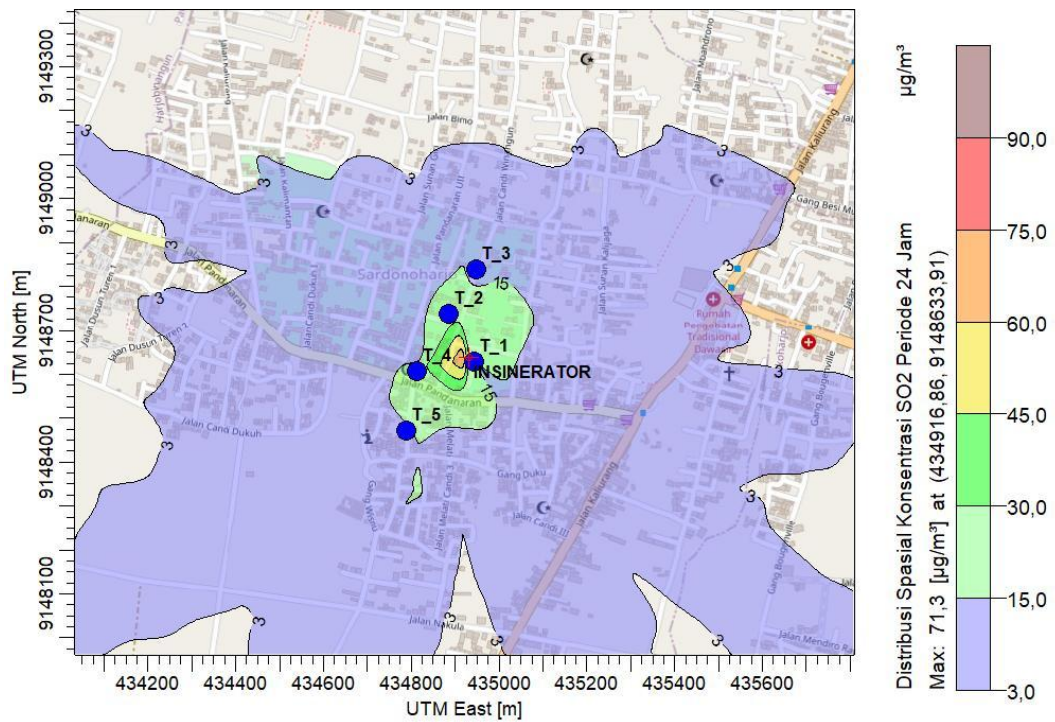
4.4. Pemodelan Dispersi SO₂ dan Analisis Pola Sebaran

Hasil pemodelan dispersi SO₂ menggunakan AERMOD menunjukkan variasi distribusi konsentrasi yang signifikan secara spasial dan temporal di sekitar TPS3R Randu Alas. Perbedaan pola sebaran terlihat jelas antara konsentrasi maksimum 1 jam dan maksimum 24 jam, baik dari sisi intensitas maupun luasan

area terdampak. Variasi ini mencerminkan pengaruh waktu perataan (*averaging time*), dinamika meteorologi, serta karakteristik sumber emisi terhadap pembentukan dan perkembangan plume di atmosfer.



Gambar 4.4 Peta Isopleth Konsentrasi SO₂ Periode 1 Jam



Gambar 4.5 Peta Isopleth Konsentrasi SO₂ Periode 24 Jam

Perbandingan visual pola sebaran konsentrasi maksimum 1 jam dan 24 jam disajikan pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5. Pada periode 1 jam, terlihat zona konsentrasi tinggi yang terlokalisasi di sekitar cerobong insinerator dengan gradien konsentrasi yang tajam, ditandai perubahan warna dari merah/oranye ke hijau dalam jarak relatif pendek. Sebaliknya, pada periode 24 jam distribusi konsentrasi menunjukkan intensitas lebih rendah dengan batas antar kelas lebih halus dan penyebaran yang lebih merata.

Konsentrasi maksimum 1 jam diprediksi mencapai $185,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan teridentifikasi pada area sangat dekat dengan titik lepas emisi. Nilai ini melampaui baku mutu udara ambien sebesar $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sehingga menunjukkan potensi pelampauan standar secara temporer pada kondisi meteorologi tertentu. Secara spasial, zona konsentrasi tertinggi berada pada area *near-field* di sekitar sumber emisi dan tidak menyebar luas ke seluruh domain pemodelan.

Tingginya konsentrasi pada zona dekat sumber dipengaruhi oleh karakteristik cerobong dengan tinggi relatif rendah sehingga *plume* belum mengalami kenaikan efektif (*plume rise*) dan pencampuran vertikal optimal sebelum mencapai permukaan. Kondisi ini sesuai dengan prinsip dispersi Gaussian bahwa tinggi efektif cerobong berperan penting dalam menentukan lokasi dan besarnya konsentrasi maksimum di permukaan. Pada kondisi angin rendah atau stabilitas atmosfer tinggi, *plume* cenderung menyebar horizontal dengan pencampuran vertikal terbatas sehingga konsentrasi puncak terakumulasi di sekitar sumber.

Tabel 4.4 Konsentrasi Model SO_2 1 jam di Lima Reseptor

No.	Titik Reseptor	Lokasi	Konsentrasi model 1 jam	Satuan
1.	1	TPS 3R Randu Alas, Candi Karang, Sardonoarjo	98,50	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
2.	2	Gg. Randu Alas 4, Jl. Candi Winangun, Sardonoarjo	93,78	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
3.	3	Candi Karang, Jl. Candi Winangun, Sardonoarjo	107,44	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
4.	4	Jl. Pandanaran No.60, Candi Winangun, Sardonoarjo	77,27	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
5.	5	Gg. Rambutan No.3, Candi Dukuh, Sardonoarjo	53,28	$\mu\text{g}/\text{m}^3$

Meskipun terjadi pelampauan baku mutu pada zona sangat dekat sumber, nilai konsentrasi maksimum 1 jam pada reseptor permukiman yang dirangkum dalam Tabel 4.4 berada pada rentang 53,28-107,44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Seluruh nilai tersebut masih berada di bawah baku mutu 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sehingga kawasan hunian tidak mengalami pelampauan standar pada skenario maksimum yang dimodelkan. Temuan ini menunjukkan bahwa proses adveksi dan turbulensi atmosfer berperan dalam menurunkan konsentrasi sebelum plume mencapai area permukiman.

Berbeda dengan periode 1 jam, konsentrasi maksimum 24 jam menunjukkan nilai yang jauh lebih rendah dan tidak melampaui baku mutu harian sebesar 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Visualisasi pada Gambar 4.5 memperlihatkan bahwa zona konsentrasi relatif tinggi tetap terpusat di sekitar insinerator, namun dengan intensitas yang menurun signifikan dibandingkan periode pendek. Pola gradien yang lebih landai mengindikasikan bahwa fluktuasi konsentrasi sesaat telah mengalami perataan akibat proses averaging temporal dan pencampuran atmosfer selama periode waktu yang lebih panjang.

Tabel 4.5 Konsentrasi Model SO_2 24 jam pada Reseptor Permukiman

No.	Nama Reseptor	Lokasi	Konsentrasi model 24 jam	Satuan
1.	1	TPS 3R Randu Alas, Candi Karang, Sardonoarjo	14,77	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
2.	2	Gg. Randu Alas 4, Jl. Candi Winangun, Sardonoarjo	21,67	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
3.	3	Candi Karang, Jl. Candi Winangun, Sardonoarjo	10,80	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
4.	4	Jl. Pandanaran No.60, Candi Winangun, Sardonoarjo	22,41	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
5.	5	Gg. Rambutan No.3, Candi Dukuh, Sardonoarjo	13,21	$\mu\text{g}/\text{m}^3$

Nilai konsentrasi maksimum 24 jam pada reseptor permukiman yang dirangkum dalam Tabel 4.5 berada pada rentang 10,80-22,41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, yang seluruhnya jauh di bawah baku mutu 24 jam yang berlaku yaitu 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Kondisi ini menunjukkan bahwa potensi paparan kronis masyarakat terhadap SO_2 relatif rendah pada skenario operasional yang dimodelkan. Selain itu, karakter

operasional insinerator yang tidak berlangsung secara kontinu selama 24 jam turut membatasi akumulasi polutan secara harian.

Secara keseluruhan, hasil pemodelan menunjukkan bahwa risiko utama lebih berkaitan dengan potensi paparan akut jangka pendek pada zona sangat dekat sumber dibandingkan risiko paparan kronis pada kawasan permukiman. Meskipun kawasan hunian tidak mengalami pelampauan baku mutu, keberadaan hotspot yang melampaui standar pada periode 1 jam mengindikasikan perlunya evaluasi teknis terhadap desain cerobong dan sistem pengendalian emisi. Optimalisasi tinggi efektif cerobong atau peningkatan efisiensi pembakaran berpotensi menurunkan konsentrasi maksimum di permukaan dan meningkatkan margin keamanan terhadap standar kualitas udara ambien.

4.5. Validasi Kinerja Model Dispersi AERMOD

Validasi model dilakukan untuk menilai kemampuan AERMOD dalam merepresentasikan konsentrasi SO_2 yang terukur di lapangan melalui perbandingan antara konsentrasi observasi (C_o) dan konsentrasi prediksi model (C_p) pada lokasi serta periode yang sama. Evaluasi ini mengacu pada parameter statistik yang direkomendasikan oleh Chang dan Hanna (2004) sebagaimana dijelaskan pada Subbab 3.4.3. Pendekatan tersebut bertujuan memastikan bahwa hasil pemodelan tidak hanya mendekati nilai pengukuran, tetapi juga konsisten secara pola dan distribusi spasial.

Tabel 4.6 Perbandingan Konsentrasi Observasi dan Prediksi Model

Nama Reseptor	C_o (Observasi)	C_p (Prediksi)
1	89,67	98,50
2	83,31	93,78
3	77,76	107,44
4	77,72	77,27
5	52,70	53,28
Rata-rata	76,23	86,05

Perbandingan antara konsentrasi hasil pengukuran dan prediksi model pada lima titik reseptor disajikan pada Tabel 4.6. Secara umum, nilai prediksi model sedikit lebih tinggi dibandingkan hasil observasi, dengan rata-rata C_p sebesar 86,05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan rata-rata C_o sebesar 76,23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Selisih terbesar terlihat

pada reseptor T3, sedangkan pada T4 nilai prediksi hampir identik dengan hasil pengukuran. Meskipun terdapat kecenderungan overestimasi ringan, pola peningkatan dan penurunan konsentrasi antar reseptor tetap konsisten antara hasil model dan data lapangan, yang menunjukkan bahwa model mampu merepresentasikan karakteristik sebaran SO₂ secara spasial.

Tabel 4.7 Hasil Evaluasi Kinerja Model AERMOD

Indikator	Nilai	Interpretasi
FB	-0,12	<i>Overpredict</i> rendah
NMSE	0,03	Error kecil
MG	0,90	Bias rendah
VG	1,03	Variabilitas mendekati ideal
R	0,84	Korelasi kuat
FAC2	100%	Seluruh prediksi akurat

Untuk memperoleh gambaran kuantitatif mengenai tingkat akurasi model, dilakukan analisis statistik menggunakan beberapa indikator kinerja yang dirangkum dalam Tabel 4.7. Nilai *Fractional Bias* (FB) sebesar -0,12 menunjukkan kecenderungan overpredict yang rendah dan masih dalam batas yang dapat diterima. Nilai *Normalized Mean Square Error* (NMSE) sebesar 0,03 yang mendekati nol menunjukkan bahwa variasi error antara prediksi dan observasi relatif kecil. Konsistensi ini diperkuat oleh nilai *Geometric Mean Bias* (MG) sebesar 0,90 dan *Geometric Variance* (VG) sebesar 1,03 yang mendekati kondisi ideal, serta koefisien korelasi (R) sebesar 0,84 yang menunjukkan hubungan linear yang kuat antara data model dan observasi.

Selain itu, nilai FAC2 sebesar 100% menunjukkan bahwa seluruh hasil prediksi berada dalam rentang 0,5 hingga 2 kali nilai observasi, yang secara umum digunakan sebagai kriteria penerimaan model dispersi. Kombinasi seluruh indikator tersebut menunjukkan bahwa model AERMOD memiliki kinerja yang baik dan mampu merepresentasikan kondisi lapangan secara memadai. Meskipun terdapat kecenderungan overpredict ringan, tingkat deviasi masih dalam batas yang dapat diterima berdasarkan literatur evaluasi model, sehingga hasil pemodelan layak digunakan sebagai dasar dalam analisis risiko kesehatan lingkungan.

4.6. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL)

Penentuan jumlah responden dalam penelitian ini mengacu pada metode *Estimating a Population Proportion with Specified Absolute Precision* yang dikemukakan oleh Lwanga dan Lemeshow (1991). Perhitungan dilakukan dengan tingkat kepercayaan 95%, asumsi proporsi (P) sebesar 0,1, serta tingkat presisi absolut (d) sebesar 0,1 sehingga diperoleh kebutuhan minimum sebanyak 35 responden. Untuk meningkatkan reliabilitas hasil dan mengantisipasi kemungkinan non-response, jumlah responden yang disurvei ditingkatkan menjadi 40 orang masyarakat di sekitar TPS3R Randu Alas.

Dari total responden tersebut, dua responden tidak dimasukkan ke dalam analisis karena tidak mengalami paparan SO₂ pada jam operasional insinerator. Dengan demikian, analisis risiko dilakukan terhadap 38 responden yang merepresentasikan populasi terpapar. Data responden digunakan sebagai parameter pajanan dalam analisis ARKL, meliputi laju inhalasi, durasi pajanan harian, frekuensi pajanan tahunan, lama pajanan, dan berat badan yang memengaruhi besarnya dosis polutan yang diterima individu.

Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) dilakukan dengan mengintegrasikan parameter pajanan responden dengan konsentrasi SO₂ hasil pemodelan dispersi AERMOD sebagai input utama perhitungan risiko. Pendekatan ini dipilih karena model AERMOD yang digunakan telah melalui proses validasi dan menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik terhadap kondisi lapangan sehingga konsentrasi yang dihasilkan dinilai representatif. Selain itu, penggunaan konsentrasi berbasis model memungkinkan estimasi paparan dilakukan secara spasial sehingga setiap zona wilayah memiliki nilai konsentrasi yang berbeda sesuai posisi geografisnya terhadap sumber emisi insinerator TPS3R Randu Alas.

Wilayah studi selanjutnya dibagi menjadi sembilan zona spasial untuk menggambarkan variasi distribusi konsentrasi SO₂ di area terdampak. Pembagian zona dilakukan menggunakan ukuran sel sebesar 600 × 600 meter pada setiap zona sehingga mampu merepresentasikan distribusi risiko secara lebih terstruktur dan sistematis. Berdasarkan pendekatan kepadatan penduduk rata-rata Desa Sardonoarjo sebesar 23,41 jiwa/ha, setiap zona kajian dengan luas sekitar 36 ha

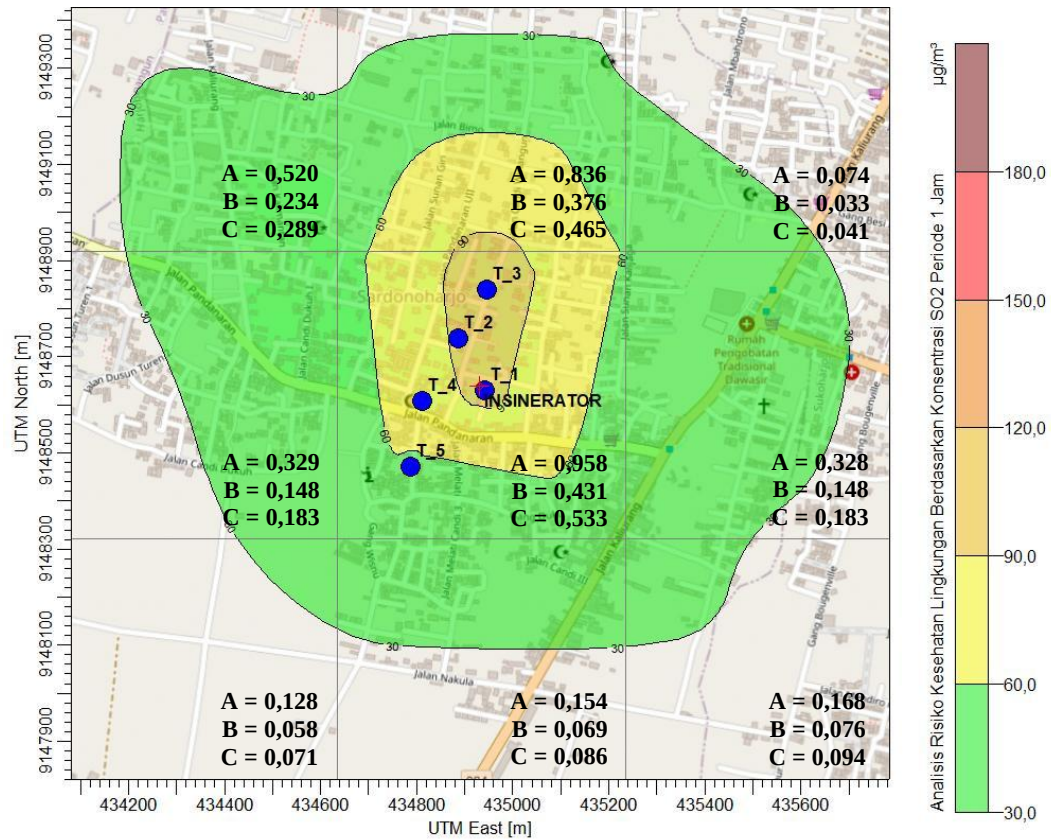
diperkirakan merepresentasikan populasi sekitar 843 jiwa. Pada masing-masing zona, nilai *Risk Quotient* (RQ) dihitung secara terpisah untuk tiga kelompok usia, yaitu anak-anak (A, usia 0-18 tahun), dewasa (B, usia 18-60 tahun), dan lansia (C, usia >60 tahun).

Nilai RQ selanjutnya dibandingkan dengan ambang batas $RQ = 1$ untuk menentukan tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik. Nilai $RQ \leq 1$ menunjukkan bahwa tingkat risiko masih berada dalam batas yang dapat diterima, sedangkan nilai $RQ > 1$ mengindikasikan adanya potensi risiko kesehatan. Pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi kemungkinan dampak kesehatan akibat paparan inhalasi SO_2 pada masyarakat di sekitar TPS3R Randu Alas.

Pada skenario paparan periode 1 jam, hasil pemodelan menunjukkan bahwa konsentrasi maksimum SO_2 mencapai $185,7 \mu g/m^3$ di sekitar lokasi sumber emisi. Konsentrasi tertinggi terkonsentrasi pada zona pusat yang mencakup area di sekitar titik T-1 hingga T-4, kemudian menurun secara bertahap ke arah luar seiring bertambahnya jarak dari sumber emisi. Pola tersebut menunjukkan adanya gradien dispersi yang dipengaruhi oleh jarak terhadap sumber emisi dan proses pengenceran atmosferik selama polutan bergerak mengikuti arah angin dominan.

Pada Gambar 4.6 menunjukkan nilai RQ tertinggi pada skenario 1 jam ditemukan pada zona terdekat dengan sumber emisi untuk kelompok anak-anak dengan nilai mencapai $A = 0,958$. Pada zona yang sama, kelompok dewasa dan lansia masing-masing menunjukkan nilai $B = 0,431$ dan $C = 0,533$. Nilai tersebut masih berada di bawah ambang batas risiko, namun kelompok anak-anak menunjukkan nilai yang mendekati $RQ = 1$ sehingga memiliki tingkat kerentanan yang lebih tinggi dibandingkan kelompok usia lainnya.

Sebaliknya, nilai RQ terendah ditemukan pada zona terluar, khususnya bagian barat daya wilayah studi. Nilai RQ pada area tersebut berada pada kisaran $A = 0,05$, $B = 0,02$, dan $C = 0,03$ yang menunjukkan bahwa pengaruh paparan menurun secara signifikan seiring bertambahnya jarak dari sumber emisi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa distribusi risiko kesehatan akibat paparan SO_2 tidak bersifat merata dan cenderung terkonsentrasi pada area yang dekat dengan sumber pembakaran.

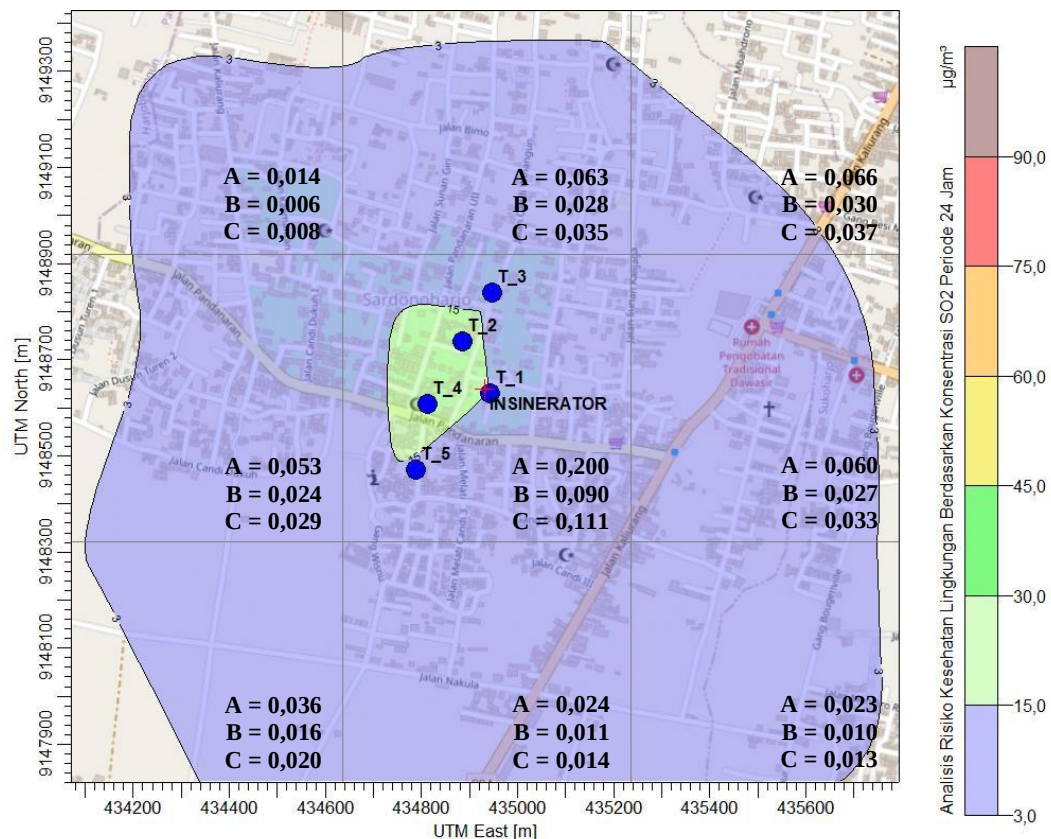


Gambar 4.6 Distribusi Spasial Nilai RQ Paparan SO₂ Periode 1 Jam di Sekitar TPS3R Randu Alas

Pola distribusi spasial RQ pada periode 1 jam menunjukkan gradien yang jelas dari pusat menuju bagian tepi wilayah terdampak. Zona dengan nilai RQ tertinggi berada pada area yang dekat dengan cerobong insinerator dan searah dengan pola dispersi dominan hasil pemodelan AERMOD. Kondisi ini menunjukkan bahwa paparan puncak jangka pendek (*short-term peak exposure*) menjadi faktor penting yang perlu diperhatikan dalam evaluasi risiko kesehatan masyarakat sekitar TPS3R.

Sebagai pembanding, pemodelan juga dilakukan untuk skenario rata-rata 24 jam guna merepresentasikan paparan harian secara keseluruhan. Pada skenario ini, konsentrasi maksimum SO₂ tercatat sebesar 71,3 µg/m³, yang lebih rendah dibandingkan periode 1 jam akibat adanya pengenceran temporal selama periode non-operasional insinerator. Penurunan konsentrasi tersebut menunjukkan bahwa aktivitas pembakaran insinerator lebih dominan menghasilkan lonjakan emisi sesaat dibandingkan paparan kontinu dalam jangka panjang.

Pada Gambar 4.7 menunjukkan nilai RQ tertinggi pada periode 24 jam ditemukan pada zona sekitar sumber emisi dengan nilai $A = 0,200$, $B = 0,090$, dan $C = 0,111$. Sementara itu, nilai RQ terendah berada pada zona terluar dengan nilai mendekati $A = 0,022$, $B = 0,010$, dan $C = 0,012$. Seluruh nilai RQ pada skenario 24 jam berada di bawah ambang batas sehingga menunjukkan bahwa tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik akibat paparan rata-rata harian masih berada dalam batas yang dapat diterima.



Gambar 4.7 Distribusi Spasial Nilai RQ Paparan SO₂ Periode 24 Jam di Sekitar TPS3R Randu Alas

Perbandingan kedua skenario menunjukkan bahwa nilai RQ pada periode 1 jam secara konsisten lebih tinggi dibandingkan periode 24 jam pada seluruh zona dan kelompok usia. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa paparan SO₂ dari insinerator TPS3R Randu Alas lebih bersifat paparan puncak sesaat (*short-term peak exposure*) dibandingkan paparan kumulatif harian. Dengan demikian, pengendalian emisi pada jam operasional pembakaran menjadi aspek yang lebih krusial dalam upaya mitigasi risiko kesehatan lingkungan.

Ditinjau berdasarkan kategori usia, kelompok anak-anak secara konsisten menunjukkan nilai RQ tertinggi pada seluruh skenario dan zona. Kondisi tersebut dapat dijelaskan secara fisiologis karena anak-anak memiliki rasio laju inhalasi terhadap berat badan yang lebih tinggi dibandingkan kelompok usia lainnya. Akibatnya, pada konsentrasi lingkungan yang sama, dosis polutan yang diterima per satuan berat badan menjadi lebih besar sehingga kelompok anak-anak lebih rentan terhadap paparan polutan udara.

Hasil analisis juga menunjukkan bahwa distribusi risiko kesehatan dipengaruhi oleh variasi spasial konsentrasi hasil pemodelan AERMOD. Zona yang berada lebih dekat dengan sumber emisi memiliki konsentrasi SO₂ dan nilai RQ yang lebih tinggi dibandingkan zona yang berada lebih jauh. Selain dipengaruhi oleh jarak, pola sebaran tersebut juga dipengaruhi oleh karakteristik dispersi atmosfer, arah angin dominan, dan kondisi operasional insinerator selama proses pembakaran berlangsung.

Secara keseluruhan, hasil analisis ARKL berbasis pemodelan AERMOD menunjukkan bahwa risiko kesehatan non-karsinogenik akibat paparan SO₂ di sekitar TPS3R Randu Alas umumnya masih berada dalam batas yang dapat diterima. Namun demikian, nilai RQ kelompok anak-anak pada skenario paparan 1 jam yang mendekati ambang batas menunjukkan adanya potensi risiko pada kondisi paparan puncak di area terdekat dengan sumber emisi. Oleh karena itu, upaya pengendalian emisi, pengelolaan operasional insinerator, dan pemantauan kualitas udara secara berkala tetap diperlukan untuk meminimalkan potensi dampak kesehatan terhadap masyarakat sekitar, terutama pada kelompok rentan.

4.7. Implikasi Risiko terhadap Kesehatan Masyarakat dan Keterbatasan Penelitian

Hasil analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL) berbasis pemodelan dispersi menggunakan AERMOD menunjukkan bahwa secara umum mayoritas masyarakat di sekitar TPS3R Randu Alas masih berada dalam kategori risiko yang dapat diterima ($RQ \leq 1$), terutama pada skenario paparan rata-rata 24 jam. Namun demikian, pada skenario paparan jangka pendek periode 1 jam ditemukan nilai RQ tertinggi yang mendekati ambang batas risiko pada kelompok anak-anak

di zona terdekat dengan sumber emisi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa potensi risiko kesehatan akibat paparan SO₂ tidak terdistribusi secara merata dan lebih dipengaruhi oleh paparan puncak sesaat (*short-term peak exposure*) pada area yang dekat dengan insinerator. Oleh karena itu, interpretasi risiko tidak dapat hanya didasarkan pada nilai rata-rata populasi, tetapi juga perlu mempertimbangkan variasi spasial konsentrasi, kondisi operasional insinerator, serta kelompok rentan yang memiliki sensitivitas lebih tinggi terhadap paparan polutan udara.

Dalam rangka memberikan konteks terhadap hasil pemodelan tersebut, penelitian ini dilengkapi dengan data kesehatan masyarakat yang diperoleh dari fasilitas pelayanan kesehatan (faskes) terdekat di Kecamatan Ngaglik. Data yang digunakan berupa jumlah kasus penyakit pernapasan yang tercatat sepanjang tahun 2025. Selain itu, data juga mencakup jenis penyakit pernapasan yang dialami oleh masyarakat, sehingga dapat memberikan gambaran umum mengenai karakteristik gangguan kesehatan yang terjadi di wilayah studi. Distribusi lengkap jenis penyakit pernapasan yang tercatat dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Distribusi Jenis Penyakit Pernapasan Masyarakat Kecamatan Ngaglik
Tahun 2025

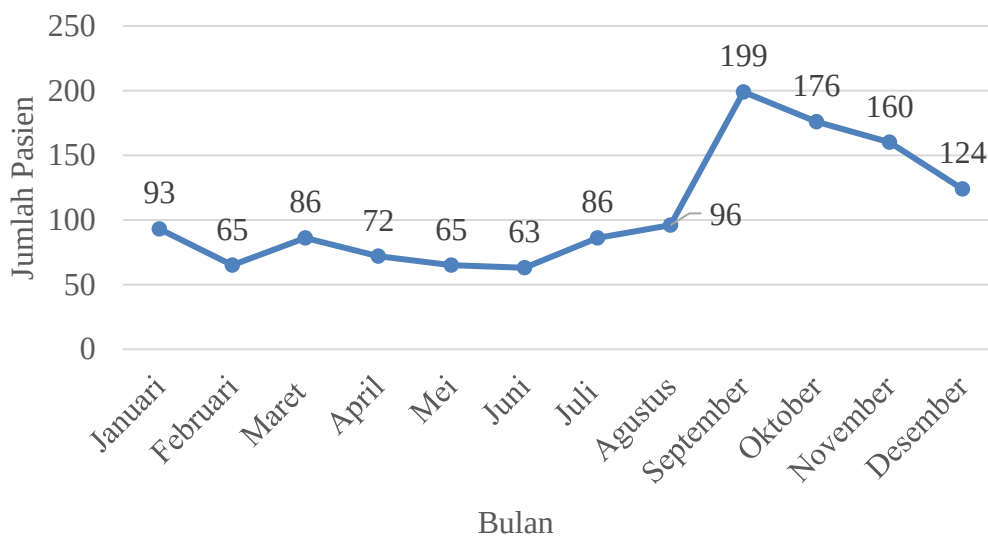
No	Jenis Penyakit	Jumlah Kasus
1	<i>Acute upper respiratory infection (ISPA)</i>	494
2	<i>Acute pharyngitis</i>	288
3	<i>Acute nasopharyngitis (common cold)</i>	278
4	<i>Influenza, virus not identified</i>	276
5	<i>Acute tonsillitis</i>	259
6	<i>Asthma</i>	235
7	<i>Tonsilofaringitis akut</i>	113
8	<i>Vasomotor and allergic rhinitis</i>	101
9	<i>Chronic rhinitis, nasopharyngitis</i>	41
10	<i>Allergic rhinitis, unspecified</i>	30
11	<i>Bronchitis (tidak spesifik akut/kronis)</i>	16
12	<i>Acute sinusitis</i>	12
13	<i>Acute bronchitis</i>	6
14	<i>Pneumonia, unspecified</i>	6
15	<i>Acute laryngitis and tracheitis</i>	4
16	<i>Bronchopneumonia</i>	3
17	<i>Acute upper respiratory infections</i>	2

	(lainnya)	
18	<i>Chronic diseases of tonsils and adenoids</i>	2
19	<i>Pulmonary oedema</i>	2
20	<i>Chronic sinusitis</i>	1
21	<i>Nasal polyp</i>	1
22	<i>Pneumonitis due to solids/liquids</i>	1
23	<i>Unspecified chronic bronchitis</i>	1
24	<i>Other nasal disorders</i>	1
25	<i>Pleural effusion</i>	1

Secara umum, penyakit yang paling banyak ditemukan didominasi oleh kelompok infeksi saluran pernapasan atas. Jenis penyakit yang paling dominan adalah *acute upper respiratory infection* (ISPA) dengan jumlah kasus sebanyak 494 pasien. Selain itu, terdapat pula *acute pharyngitis* sebanyak 288 kasus, *acute nasopharyngitis (common cold)* sebanyak 278 kasus, serta *acute tonsillitis* sebanyak 259 kasus. Dominasi kasus-kasus tersebut menunjukkan bahwa gangguan saluran pernapasan atas merupakan masalah kesehatan yang paling umum dialami masyarakat di wilayah penelitian.

Di samping kelompok infeksi akut tersebut, ditemukan juga penyakit pernapasan lainnya seperti influenza sebanyak 276 kasus dan asma sebanyak 235 kasus. Selain itu, terdapat pula kasus rhinitis alergi dan beberapa gangguan pernapasan kronis lainnya dalam jumlah yang lebih kecil. Keberadaan variasi jenis penyakit ini menunjukkan bahwa gangguan kesehatan di wilayah studi tidak hanya bersifat akut, tetapi juga mencakup kondisi inflamasi dan kronis. Hal ini mengindikasikan adanya perbedaan tingkat sensitivitas masyarakat terhadap paparan kualitas udara di lingkungan sekitar.

Penggunaan data kesehatan ini dimaksudkan sebagai informasi pendukung untuk menggambarkan kondisi kesehatan masyarakat di wilayah studi. Data tersebut tidak digunakan untuk menguji hubungan kausal secara langsung antara paparan SO₂ dan kejadian penyakit. Dengan demikian, interpretasi yang dilakukan tetap berada dalam konteks deskriptif dan pendukung terhadap hasil analisis risiko yang telah diperoleh. Pendekatan ini penting untuk menjaga kehati-hatian dalam penarikan kesimpulan ilmiah.



Gambar 4.8 Grafik Jumlah Kasus Penyakit Pernapasan Masyarakat Kecamatan Ngaglik Tahun 2025

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.8, terlihat adanya fluktuasi jumlah kasus penyakit pernapasan sepanjang tahun. Pada beberapa periode, khususnya menjelang akhir tahun, terjadi peningkatan jumlah kasus yang cukup signifikan dibandingkan bulan-bulan sebelumnya. Variasi ini menunjukkan bahwa kejadian gangguan kesehatan pernapasan bersifat dinamis dan dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan maupun aktivitas masyarakat.

Pola temporal yang muncul pada data kesehatan tersebut dapat memberikan gambaran umum mengenai periode dengan potensi peningkatan beban gangguan kesehatan di wilayah studi. Jika dikaitkan dengan hasil analisis ARKL, peningkatan kasus pada periode tertentu menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan waktu terjadinya peningkatan risiko paparan, khususnya pada periode siang hari. Selain itu, dominasi nilai RQ yang lebih tinggi pada kelompok anak-anak juga relevan dengan karakteristik kelompok rentan terhadap gangguan pernapasan. Kesesuaian pola ini tidak dapat diinterpretasikan sebagai hubungan sebab-akibat secara langsung, namun dapat digunakan sebagai indikasi adanya relevansi kontekstual antara hasil pemodelan dan kondisi kesehatan masyarakat.

Meskipun demikian, interpretasi terhadap keterkaitan antara hasil pemodelan dan data kesehatan masyarakat perlu dilakukan secara hati-hati. Data kesehatan yang digunakan bersifat agregat dan tidak mengandung informasi spesifik mengenai tingkat paparan individu terhadap SO_2 . Hal ini menyebabkan

analisis hubungan eksposur-respons tidak dapat dilakukan secara langsung dalam penelitian ini. Selain itu, kejadian penyakit pernapasan juga dipengaruhi oleh berbagai faktor lain seperti kebiasaan merokok, kondisi lingkungan tempat tinggal, serta paparan polutan dari sumber lain.

Selain keterbatasan pada data kesehatan, penelitian ini juga memiliki keterbatasan pada aspek pemodelan dan pengukuran lapangan. Periode pengukuran kualitas udara yang terbatas menyebabkan hasil pemodelan belum sepenuhnya merepresentasikan variasi kondisi meteorologi sepanjang tahun. Faktor seperti arah dan kecepatan angin, stabilitas atmosfer, serta suhu udara memiliki pengaruh signifikan terhadap pola dispersi polutan. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh lebih mencerminkan kondisi pada periode pengamatan tertentu.

Keterbatasan lainnya berkaitan dengan ketersediaan data operasional insinerator yang belum terdokumentasi secara rinci. Variasi laju emisi yang terjadi dalam kondisi operasional nyata tidak dapat dimasukkan secara dinamis ke dalam model AERMOD. Di samping itu, kendala teknis selama kegiatan sampling, seperti kondisi hujan yang menghambat penggunaan alat impinger, turut mempengaruhi kelengkapan data lapangan. Meskipun demikian, langkah penyesuaian telah dilakukan untuk memastikan bahwa hasil analisis tetap dapat merepresentasikan kondisi secara umum.

Secara keseluruhan, integrasi antara hasil analisis risiko berbasis pemodelan dan data kesehatan masyarakat menunjukkan adanya kesesuaian pola yang mengindikasikan potensi keterkaitan antara paparan polutan udara dan gangguan kesehatan pernapasan. Namun demikian, hasil penelitian ini lebih tepat dipandang sebagai identifikasi potensi risiko berbasis pemodelan yang didukung oleh indikasi kondisi kesehatan masyarakat. Mengingat keterbatasan data dan pendekatan yang digunakan, diperlukan penelitian lanjutan dengan cakupan yang lebih komprehensif. Pendekatan seperti pengukuran jangka panjang dan studi berbasis individu diperlukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai dampak kesehatan akibat paparan SO_2 .

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai analisis risiko kesehatan paparan SO₂ dari emisi insinerator di TPS3R Randu Alas menggunakan pendekatan pemodelan dispersi AERMOD, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Tingkat Konsentrasi SO₂ di Sekitar Insinerator.
 - a. Hasil pengukuran udara ambien menunjukkan bahwa konsentrasi SO₂ di sekitar TPS3R Randu Alas berada pada rentang 52,70-89,67 µg/m³, sedangkan secara temporal berada pada rentang 57,69-98,08 µg/m³ dengan konsentrasi tertinggi teridentifikasi pada titik 1 pada periode siang hari. Seluruh nilai tersebut masih berada di bawah baku mutu udara ambien sesuai Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 sebesar 150 µg/m³ untuk rata-rata waktu 1 jam. Dengan demikian, secara kualitas udara ambien, kondisi lingkungan di sekitar permukiman masih memenuhi standar yang berlaku.
 - b. Hasil pengukuran emisi cerobong menunjukkan bahwa konsentrasi SO₂ terkoreksi sebesar 383,21 mg/Nm³ melebihi baku mutu emisi insinerator sebesar 210 mg/Nm³ sesuai Permen LHK Nomor 70 Tahun 2016. Tingginya nilai konsentrasi terkoreksi dipengaruhi oleh kadar O₂ aktual yang sangat tinggi sebesar 20,735%, sehingga faktor koreksi terhadap O₂ acuan 11% meningkat secara signifikan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik operasional insinerator, terutama *excess air* dan suplai udara berlebih akibat penggunaan blower, memiliki pengaruh besar terhadap hasil evaluasi emisi secara regulatif.
2. Hasil pemodelan dispersi menggunakan AERMOD menunjukkan bahwa distribusi konsentrasi SO₂ bervariasi secara spasial dan temporal. Konsentrasi maksimum periode 1 jam mencapai 185,7 µg/m³ dan teridentifikasi pada area sangat dekat dengan cerobong insinerator, sehingga berpotensi melampaui baku mutu udara ambien sebesar 150 µg/m³ pada kondisi meteorologi tertentu. Namun demikian, zona dengan

konsentrasi tinggi bersifat lokal dan tidak meluas ke kawasan permukiman.

Pada reseptor permukiman, konsentrasi maksimum 1 jam berada pada rentang 53,28-107,44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan seluruhnya masih berada di bawah baku mutu. Sementara itu, konsentrasi maksimum 24 jam berada pada rentang 10,80-22,41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, yang jauh di bawah baku mutu harian sebesar 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Secara keseluruhan, hasil pemodelan menunjukkan bahwa potensi pelampauan standar lebih berkaitan dengan paparan akut jangka pendek di area dekat sumber dibandingkan paparan kronis pada kawasan hunian.

3. Hasil analisis *Risk Quotient* (RQ) berbasis pemodelan AERMOD menunjukkan bahwa secara umum mayoritas masyarakat di sekitar TPS3R Randu Alas masih berada dalam kategori risiko yang dapat diterima ($\text{RQ} \leq 1$), terutama pada skenario paparan rata-rata 24 jam. Pada periode tersebut, seluruh kelompok usia menunjukkan nilai RQ di bawah ambang batas sehingga risiko kesehatan non-karsinogenik akibat paparan harian SO_2 relatif masih terkendali. Distribusi nilai RQ juga menunjukkan bahwa tingkat risiko menurun seiring bertambahnya jarak dari sumber emisi.

Pada skenario paparan jangka pendek periode 1 jam, nilai RQ tertinggi ditemukan pada kelompok anak-anak di zona terdekat dengan sumber emisi dengan nilai mencapai 0,958, yang mendekati ambang batas risiko. Kelompok anak-anak menjadi kelompok paling rentan karena memiliki rasio laju inhalasi terhadap berat badan yang lebih tinggi dibandingkan kelompok usia lainnya sehingga dosis paparan yang diterima per kilogram berat badan menjadi lebih besar. Dengan demikian, meskipun secara umum risiko kesehatan akibat paparan SO_2 masih berada dalam batas yang dapat diterima, pengendalian emisi pada jam operasional insinerator serta perlindungan terhadap kelompok rentan tetap diperlukan untuk meminimalkan potensi dampak kesehatan di sekitar TPS3R Randu Alas.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengukuran kualitas udara ambien dalam periode yang lebih panjang serta mencakup variasi musiman untuk memperoleh gambaran konsentrasi SO_2 yang lebih komprehensif. Variasi kondisi meteorologi tahunan berpotensi memengaruhi pola dispersi dan tingkat paparan, sehingga analisis jangka panjang dapat meningkatkan akurasi estimasi risiko.
2. Studi lanjutan dapat mempertimbangkan penggunaan data operasional insinerator yang lebih rinci, termasuk variasi beban pembakaran dan fluktuasi emisi harian, guna meningkatkan ketelitian input pemodelan dispersi. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang lebih realistis terhadap potensi konsentrasi maksimum dan dinamika plume di atmosfer.
3. Penelitian berikutnya juga dapat memperluas cakupan analisis risiko dengan mempertimbangkan parameter individual yang lebih spesifik, seperti variasi pola aktivitas harian, kondisi kesehatan awal responden, serta karakteristik ventilasi bangunan tempat tinggal. Pendekatan ini akan menghasilkan estimasi *Risk Quotient* (RQ) yang lebih personal dan representatif terhadap kondisi paparan aktual.
4. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengukuran dan analisis terhadap parameter pencemar udara lainnya, seperti CO, NO_x , total partikulat, dan parameter penting lainnya sehingga dapat dilakukan perbandingan karakteristik dispersi serta tingkat risiko kesehatan antar polutan. Pendekatan multi-parameter ini memungkinkan evaluasi kualitas udara yang lebih komprehensif, mengingat setiap polutan memiliki sifat fisik-kimia, mekanisme dispersi, serta dampak kesehatan yang berbeda. Dengan demikian, hasil analisis tidak hanya terbatas pada SO_2 , tetapi juga dapat memberikan gambaran menyeluruh terkait potensi risiko paparan udara ambien di lokasi penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, J., & Purqon, A. (2018). Pemodelan Polusi Udara dengan Gaussian Plume. *Jurnal LPPM*, 8(4), 33-38.
- Abumounshar, N. M., Ibrahim, S., & Raj, A. (2021). A detailed reaction mechanism for elemental sulphur combustion in the furnace of sulphuric acid plants. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 99(11), 2441-2451.
- Anugrah, N. (2017). Analisa Dispersi Sulfur Dioksida (SO₂) Dari Sumber Point Source Insinerator Rumah Sakit St. Antonius Menggunakan Model METI-LIS. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 5(1).
- Aprilia, A. (2023). Analisis Sebaran Emisi SO₂ dan NO₂ dari Cerobong Boiler Industri Pengolahan Kelapa Sawit dengan Model AERMOD di PT Perkebunan Nusantara VI Unit Usaha Pinang Tinggi Kabupaten Muaro Jambi (Doctoral dissertation, Teknik Lingkungan).
- Arna, Y. D., Mokodongan, R. S., Rina, W., Redha, P. S., Sari, J. N., Wally, R., ... & Simaremare, S. R. S. (2025). Pencemaran Udara. Jawa Tengah: PT Media Pustaka Indo.
- Assegaf, A. H. (2018). Pemodelan Dispersi Gas dari Cerobong dengan Model Gaussian. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, 8(3), 414-419.
- Bodénan, F., & Deniard, P. (2003). Characterization of flue gas cleaning residues from European solid waste incinerators: assessment of various Ca-based sorbent processes. *Chemosphere*, 51(5), 335-347.
- Buanawati, T. T., Huboyo, H. S., & Samadikun, B. P. (2017). Estimasi Emisi Pencemar Udara Konvensional (SO_x, NO_x, CO, dan PM) Kendaraan Pribadi Berdasarkan Metode International Vehicle Emission (IVE) Di Beberapa Ruas Jalan Kota Semarang (Doctoral dissertation, Diponegoro University).
- Cahyono, T. (2017) *Penyehatan Udara*. Edited By Erang Risanto. Yogyakarta: Penerbit ANDI (Anggota IKAPI)

- Cau, P., Muroi, D., Satta, G., Milesi, C., & Casari, C. (2025). AERQ—A Web-Based Decision Support Tool for Air Quality Assessment. *Applied Sciences*, 15(4), 2045.
- Chang, J. C., & Hanna, S. R. (2004). Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87(1), 167-196.
- Chou, C. L. (2012). Sulfur in coals: A review of geochemistry and origins. *International journal of coal geology*, 100, 1-13.
- Ćirović, Ž. M., Ćujić, M. R., Radenković, M. B., Obradović, J. R., & Onjia, A. E. (2023). AERMOD air dispersion modeling and health risks of gas and oil fueled heating plant emissions. *Thermal Science*, 27(3 Part B), 2321-2331.
- Cuthbertson, A. A., Lincoln, C., Miscall, J., Stanley, L. M., Maurya, A. K., Asundi, A. S., ... & Beckham, G. T. (2024). Characterization of polymer properties and identification of additives in commercially available research plastics. *Green Chemistry*, 26(12), 7067-7090.
- Damri, D., Ilza, M., & Afandi, D. (2016). Analisis Paparan CO Dan SO₂ Pada Petugas Parkir di Basement Mall Ska di Kota Pekanbaru. *Dinamika Lingkungan Indonesia*, 3(1), 47-56.
- Das, R., Khezri, B., Srivastava, B., Datta, S., Sikdar, P. K., Webster, R. D., & Wang, X. (2015). Trace element composition of PM_{2.5} and PM₁₀ from Kolkata-a heavily polluted Indian metropolis. *Atmospheric Pollution Research*, 6(5), 742-750.
- Devara, V. A. (2025). Pengaruh Cone Nozzle Pada Ventury Wet Scrubber Untuk Menurunkan Emisi Gas Buang Insinerator (Doctoral dissertation, Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa).
- EPA, US. (2004). User's guide for the AMS/EPA regulatory model (AERMOD).
- EPA, US. (2017). Integrated Science Assessment (ISA) for Sulfur Oxides - Health Criteria (Final Report, Dec 2017). Washington; United States.
- EPA, US. (2025). Sulfur Dioxide Basics. Diakses 31 Oktober 2025 dari <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics>
- Eslami Doost, Z., Dehghani, S., Samaei, M. R., Arabzadeh, M., Baghapour, M. A., Hashemi, H., ... & De Marcoc, A. (2023). Dispersion of SO₂ emissions in a gas refinery by AERMOD modeling and human health risk: a case study

- in the Middle East. *International Journal of Environmental Health Research*, 34(2), 1227-1240.
- Fatmawati, A., Petrus, S., & Muflihun, M. (2023). Pengaruh Konsumsi Bahan Bakar Solar Dan Dexlite Terhadap Engine Kendaraan Ringan. *Mekanik: Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Mesin*, 16(1), 8-13.
- Fontana, M. G., & Greene, N. D. (1978). *Corrosion Engineering*. Edisi ke-2, McGrawHill, NewYork.
- Halulanga, A. J., Rosdiana, R., & Adami, A. (2021). Uji Kandungan Gas Sulfur Dioksida (SO₂) pada Udara Ambien Akibat Adanya Pembakaran Batubara PLTU Nii Tanasa, Sulawesi Tenggara. *Jurnal TELUK: Teknik Lingkungan UM Kendari*, 1(2), 05-10.
- Harahap, E. S. (2022). *Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Akibat Paparan Tembaga (Cu) Dan PM10 Pada Komunitas Pengrajin Emas Satando Di Kelurahan Malimongan Makassar= Environmental Health Risk Assessment Due to Copper (Cu) And PM10 Exposure on The Satando's Goldsmith Community in Malimongan Makassar* (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin).
- Hemida Wahyu Isramadhanti, H. (2021). *Gambaran Kualitas Udara Di Kota Yogyakarta Berdasarkan Pemantauan Air Quality Monitoring System Tahun 2019-2020* (Doctoral dissertation, Poltekkes Kemenkes Yogyakarta).
- Hermawan, Q. F., Khoirunisa, N., Sihotang, Z., Riza, M., & Wasono, W. (2025). Pengaruh kualitas batu bara terhadap produksi gas SO₂ dan NO_x: studi kasus PLTU “Lentera”. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan (Journal of Environmental Sustainability Management)*, 213-232.
- Hesami Arani, M., Jaafarzadeh, N., Moslemzadeh, M., Rezvani Ghalhari, M., Bagheri Arani, S., & Mohammadzadeh, M. (2021). Dispersion of NO₂ and SO₂ pollutants in the rolling industry with AERMOD model: a case study to assess human health risk. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19(2), 1287-1298.

- Holmes, N. S., & Morawska, L. (2006). A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. *Atmospheric environment*, 40(30), 5902-5928.
- Husnaeni, H., & Anggriyani, F. C. W. (2024). Dampak Lingkungan dan Strategi Pengendalian Pencemaran Udara. *Komprehensif*, 2(2).
- Jawwad, M. A. S., Murti, R. H. A., & Citrasari, N. (2023). Analisis dan Model Dispersi Emisi Udara di TPA Klotok, Kediri. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 5(1).
- Joyosemito, I. S., Meilani, S. S., & Azmi, M. (2025). Evaluating Environmental and Public Health Risks of Medical Waste Incineration Using Air Dispersion Modeling in Indonesia. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 24(3), 259-269.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, Direktorat Jenderal Pengendalian Penyakit dan Penyehatan Lingkungan. (2012). *Pedoman analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL)*.
- Kristianto, D., & Khamelda, L. (2018). Penilaian Resiko Kesehatan Lingkungan-EHRA (Fasilitas dan Perilaku Warga Perumahan Karanglo Indah) Terhadap Sampah Rumah Tangga.
- Kusumaningrum, A. V. (2023). *Analisis risiko logam berat pada air tanah dan kualitas air lindi di sekitar TPA Banyuroto Kabupaten Kulonprogo* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia).
- Larasati, A. F., & Santoso, E. B. (2023). Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Transisi Ekonomi Sirkular Dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga di Kota Surabaya. *Jurnal Penataan Ruang*, 18(9).
- Lwanga, S. K., & Lemeshow, S. (1991). Sample size determination in health studies. *Geneva: World Health Organization*, 1.
- Masito, A. (2018). Analisis Risiko Kualitas Udara Ambien (NO₂ Dan SO₂) dan Gangguan Pernapasan pada Masyarakat di Wilayah Kalianak Surabaya. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 10(4), 394-401.
- Maulana, R., Maulana, M. I., Indrawan, A. K., & Angelica, L. (2023). Mengeksplorasi Kebijakan Berbasis Bukti dan Partisipasi dalam Pengelolaan Sampah di Lingkungan Kampus Unpad.

- Mohammad, W. (2021). Peran Badan Meteorologi, Klimatologi, Dan Geofisika (Bmkg) Semarang untuk Memperkirakan dan Menentukan Tingkat Kelembaban Udara dan Angin di Wilayah Tanjung Emas Semarang. *Karya Tulis*.
- Mulud, T. H., & Wahyono (2015). Pengaruh Excess Air Terhadap Flue Gas Di PLTU Tanjung Jati B Unit 2. *Eksergi*, 11(3).
- Mustamin, T., Rahim, R., Mulyadi, R., Jamala, N., & Kusno, A. (2017). Analisis Fluktuasi Temperatur Udara dalam Ruang pada Ruang Seminar Laboratorium Sains dan Bangunan Kampus Gowa. Temu Ilmiah IPLBI, (1). <https://doi.org/10.32315/ti.6.h041>
- Narto, A., & Utari, R. (2023). Implementasi Alat Pembakar Sampah Menggunakan Smart Portable Incinerator Dalam Penanggulangan Sampah Dari Pengoperasian Kapal. *JURNAL SAINS DAN TEKNOLOGI MARITIM*, 24(1), 49-60.
- National Center for Biotechnology Information (2025). PubChem Compound Summary for CID 1119, Sulfur Dioxide. Diakses 31 Oktober 2025 dari <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sulfur-Dioxide>.
- Natsir, T. A., Pambarep, Y. W., Susetyaningsih, R., Setyanto, K., & Dewi, R. (2017). Penggunaan AERMOD untuk Kajian Simulasi Dampak Pencemaran Karbon Monoksida di Kota Yogyakarta Akibat Emisi Kendaraan Bermotor (Using AERMOD to Simulation Study of Carbon Monoxide Pollution Effect in Yogyakarta City Caused by the Emission of Motor Vehicles). *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, 24(1), 11-16.
- Nugroho, A. W., & Sofyan, A. (2011). Sistem Pemodelan Kualitas Udara Terintegrasi dengan Menggunakan AERMOD, WRF-CHEM dan PYTHON. *Institut Teknologi Bandung*.
- Nurfaiza. (2024). *Pengolahan Sampah Sayuran menggunakan Insinerator dan Wet Scrubber* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia).
- Nurhisnahan, S., & Hasyim, H. (2022). Environmental health risk assessment of sulfur dioxide (SO₂) at workers around in combined cycle power plant (CCPP). *Heliyon*, 8(5).

- Ohorella, D. F. (2023). Analisis Dispersi Konsentrasi CO, NOx, dan PM10 dari Kendaraan Truk di Jalan Kabupaten Gowa= Dispersion Analysis of CO, NOx, and PM10 Concentrations from Truck Vehicles on Gowa Regency Roads (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin).
- Patil, A. A., Kulkarni, A. A., & Patil, B. B. (2014). Waste to energy by incineration. *Journal of Computing Technologies*, 3(6), 2278-3814.
- Pirbadali Somarin, A., & Peyghambarzadeh, S. M. (2020). Hazardous air pollutants emission characteristic and environmental effect of typical petrochemical incinerators. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(8), 3771-3784.
- PP. (1999). Peraturan Pemerintah No 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara.
- Prabasari, I., Hutagalung, W. L. C., Bahar, F. F., & Kumalasari, D. (2025). Pengaruh Desain Cerobong Boiler Terhadap Sebaran Emisi Partikulat Menggunakan Perangkat Pemodelan Aermid. *Jurnal Teknik*, 23(1), 206-215.
- Prodjosantoso, A. K., & Padmaningrum, R. T. (2011). Kimia Lingkungan Teori, Eksperimen, dan Aplikasi. *Universitas Negeri Yogyakarta, Penerbit Kanisius, Yogyakarta*, 51-87.
- Purnaditya, N. P. (2020). Penerapan Konsep Lagrangian-Eulerian Dalam Pengembangan Dasar Model Matematika Hidraulika Aliran dan Transportasi Polutan: Sebuah Kajian Literatur. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 9(2), 175-187.
- Putra, H.P. (2025). Mengerti Bumi: Dari Kesadaran Menuju Aksi, Mewujudkan Zero Waste Society.
- Rafidah, F., Fitriyanti., & Abidin, K. (2025). Analisis Gas Buang Insinerator dengan Filter Arang Aktif Berbasis Limbah Organik. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 13(01).
- Rahayu, D., Riyansah, A., Astuti, D. S., & Faidurrisal, F. (2021). Gerakan Zero Waste Sebagai Bentuk Peduli Pada Lingkungan Hidup di Kota Tangerang Selatan. *International Journal of Demos*, 3(2), 125-138.

- Rahmadani, N., Fitri, Y., Retnawaty, S. F., Lestari, D., Mulyani, S., & Selvia, S. (2024). Pemodelan Emisi Gas CO₂ dari Lokasi Tempat Pembuangan Akhir di Kota Pekanbaru menggunakan Dispersi AERMOD. *Jurnal Wilayah dan Lingkungan*, 12(2), 163-176.
- Rahman, M. M., Shuo, W., Zhao, W., Xu, X., Zhang, W., & Arshad, A. (2022). Investigating the Relationship between Air Pollutants and Meteorological Parameters Using Satellite Data over Bangladesh. *Remote Sensing*, 14(12), 1-21. <https://doi.org/10.3390/rs14122757>
- Rahmawati, A. (2023). Analisis Kualitas Udara Ambien Pt X Menggunakan Metode Environmental Health Risk Assessment (Ehra). *Jurnal Kesehatan Tambusai*, 4(3), 3992.
- Ramadhan, N. F. (2025). Analisis Konsentrasi Sulfur Dioksida (SO₂) Dan Hubungannya Dengan Suhu, Kelembaban Dan Kecepatan Angin Di Udara Ambien (Doctoral dissertation, Universitas Satya Negara Indonesia).
- Riza, A. U., & Mahmudah, L. (2019). Verifikasi metode Pengujian NO₂ dan SO₂ dalam Udara Ambient Verification of Method for Testing NO₂ and SO₂ in Ambinet Air. *J. Teknol. Proses dan Inov. Ind*, 4(1), 9-18.
- Rofida, Rona. (2025). Modul Pembelajaran Pencemaran Udara Dan Perubahan Iklim. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- Rood, A. S. (2014). Performance evaluation of AERMOD, CALPUFF, and legacy air dispersion models using the Winter Validation Tracer Study dataset. *Atmospheric Environment*, 89, 707-720.
- Rzeszutek, M., & Szulecka, A. (2021). Assessment of the AERMOD dispersion model in complex terrain with different types of digital elevation data. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci*, 642, 012014.
- Saidal Siburian, M. M., & Mar, M. (2020). *Pencemaran Udara dan Emisi Gas Rumah Kaca*. Kreasi Cendekia Pustaka.
- Sarwono, E., Wijayanto, E., Huda, H., Harrits, R. F., & Zain, I. F. (2022). Dispersion of SO₂ and NO₂ Emitted by Auxiliary Boiler of PT KMI Methanol Industrial Using the Gaussian Plum Model Aermოდ in Bontang City East Kalimantan Indonesia. *Jurnal Chemurgy*, 6(2), 109-117.

- Sarwono, E., Zain, I. F., Widarti, B. N., & Wijayanti, D. W. (2025). Pemodelan Dispersi Emisi SO₂, NO₂, Dan CO Insinerator Rumah Sakit Pupuk Kaltim Menggunakan Software Aermid Di Kota Bontang Kalimantan Timur Indonesia. *Jurnal Teknologi Lingkungan UNMUL*, 9(1), 25-34.
- Septiani, B. A., Arianie, D. M., Risman, V. F. A. A., Handayani, W., & Kawuryan, I. S. S. (2019). Pengelolaan sampah plastik di Salatiga: praktik dan tantangan. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(1), 90-99.
- Shetty, S. S., Deepthi, D., Harshitha, S., Sonkusare, S., Naik, P. B., & Madhyastha, H. (2023). Environmental pollutants and their effects on human health. *Heliyon*, 9(9).
- Shidqi, M. D., & AR, N. R. J. (2024). Analisis Persebaran Emisi Gas Sulfur Dioksida dari Unit 2 Pabrik Sulphuric Acid PT Petrokimia Gresik Menggunakan Model AERMOD. *Journal Serambi Engineering*, 9(2).
- Siswati, D. K., & Diyanah, K. C. (2017). Analisis risiko pajanan debu (total suspended particulate) di Unit Packer PT. X. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 9(1), 100-110.
- Sopiah, N. (2005). Transformasi Kimia Senyawa Belerang, Dampak Dan Penanganannya. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 6(1).
- Stockie, J. M. (2011). The mathematics of atmospheric dispersion modeling. *Siam Review*, 53(2), 349-372.
- Stohl, A., Forster, C., Frank, A., Seibert, P., & Wotawa, G. (2005). *Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(9), 2461-2474.
- Sudarti, S., Yushardi, Y., & Kasanah, N. (2022). Analisis potensi emisi CO₂ oleh berbagai jenis kendaraan bermotor di jalan raya kemantren kabupaten sidoarjo. *Jurnal Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 9(2), 70-75.
- Sudaryanto, S., Prasetyawati, N. D., & Sinaga, E. (2022). Sosialisasi Dampak Polusi Udara Terhadap Gangguan Kesehatan Kenyamanan Dan Lingkungan. *Midiwifery Science Session*, 1(1), 8-17.
- Sulistiani, E. (2024). Fenomena Pencemaran Lingkungan: Dampak Pencemaran Udara Terhadap Kesehatan. *Jurnal Manajemen Dan Bisnis Ekonomi*, 2(2), 301-305.

- Susilowati, T., Ashar, H., Kusrini, I., Wahyuningsih, S., Maretta, H. T., Setyaji, T., Purwanti., Ernawati, D., Prasati, M., Sukamsi., & Peluw, Z. (2023). Gender dan Tingkat kepedulian Masyarakat terhadap Sampah. *Jurnal Kesehatan Terpadu (Integrated Health Journal)*, 14(2), 93-99.
- Syahputri, J., Suarga, E. B., Rahman, I., Zahari, T. N., & Ramdani, D. A. (2023). Dampak Polusi Udara dari Sektor Transportasi terhadap Kesehatan di Indonesia. *Jakarta: Policy Note*.
- Tamba, W. P., & Laksmono, B. S. (2024). Analisis Triangle pada Implementasi Kebijakan Pengelolaan Sampah DKI Jakarta di Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Bantargebang, Kota Bekasi, Jawa Barat. *Saskara: Indonesian Journal of Society Studies*, 4(1), 115-133.
- Teerapattarada, N. (2016). Health Risk Assessment of Industrial Emissions in Map Ta Phut, Thailand using AERMOD Modeling and GIS. *International Journal of Geoinformatics*.
- Thabit, Q., Nassour, A., & Nelles, M. (2022). Flue gas composition and treatment potential of a waste incineration plant. *Applied sciences*, 12(10), 5236.
- Tunsaringkarn, T., Siriwong, W., Rungsiyothin, A., & Nopparatbundit, S. (2012). Occupational exposure of gasoline station workers to BTEX compounds in Bangkok, Thailand.
- Turner, D. B. (2020). *Workbook of atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modeling*. CRC press.
- Cheng, S., Ding, X., Dong, X., Zhang, M., Tian, X., Liu, Y., Huang, Y., & Jin, B. (2023). Immigration, transformation, and emission control of sulfur and nitrogen during gasification of MSW: Fundamental and engineering review. *Carbon Resources Conversion*, 6(3), 184-204.
- ul Haq, A., Nadeem, Q., Farooq, A., Irfan, N., Ahmad, M., & Ali, M. R. (2019). Assessment of AERMOD modeling system for application in complex terrain in Pakistan. *Atmospheric Pollution Research*, 10(5), 1492-1497.
- Wibawa, W. A. A. S. (2022). Laporan Toksikologi Lingkungan Paparan Gas Sulfur Dioksida (SO₂) Pada Pekerja di PT. XXX Gresik (Doctoral dissertation, UNIVERSITAS AIRLANGGA).

- Wibisono, H. K., Noviyanti, Y. L., Rosdiana, W., & Prastyawan, A. (2024). Kepemimpinan Mahasiswa dalam Pemberdayaan Masyarakat: Studi Program Desa Mandiri Sampah di Lamongan, Jawa Timur.
- Wicaksono, P. S. (2024). *ANALISA SEBARAN EMISI KARBON MONOKSIDA (CO) DI TPS MENGGUNAKAN SOFTWARE AERMOD* (Doctoral dissertation, UPN" Veteran" Jawa Timur).
- Widyani, A. F. (2018). *Aplikasi Model Gauss Termodifikasi Terhadap Dispersi Pencemaran Udara Dari Sumber Majemuk (Studi Kasus Industri Semen Di Kabupaten Bogor)* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- Widyarsana, I. M. W., & Zafira. (2015). Kajian Pengembangan Sistem Pengelolaan Sampah di Kabupaten Tangerang.

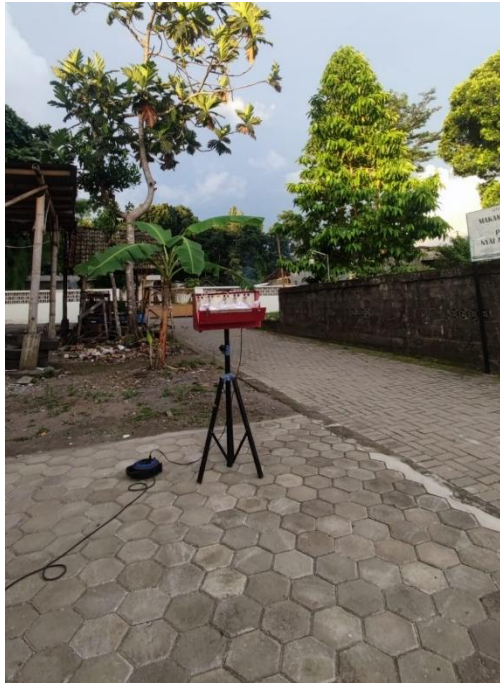
LAMPIRAN

Lampiran 1 Peta Lokasi Titik Pengukuran Udara Ambien



Peta Lokasi Penelitian

Lampiran 2 Dokumentasi Pengambilan Sampel Udara Ambien



Sampling Titik 1



Sampling Titik 2



Sampling Titik 3



Sampling Titik 4



Sampling Titik 5

Lampiran 3 Dokumentasi Uji Emisi



Proses Uji Emisi Oleh Laboran
Laboratorium Kualitas Lingkungan



Kondisi Insinerator Saat Pada
Saat Uji Emisi

Lampiran 4 Dokumentasi Uji Kualitas Udara di Laboratorium Kualitas Lingkungan

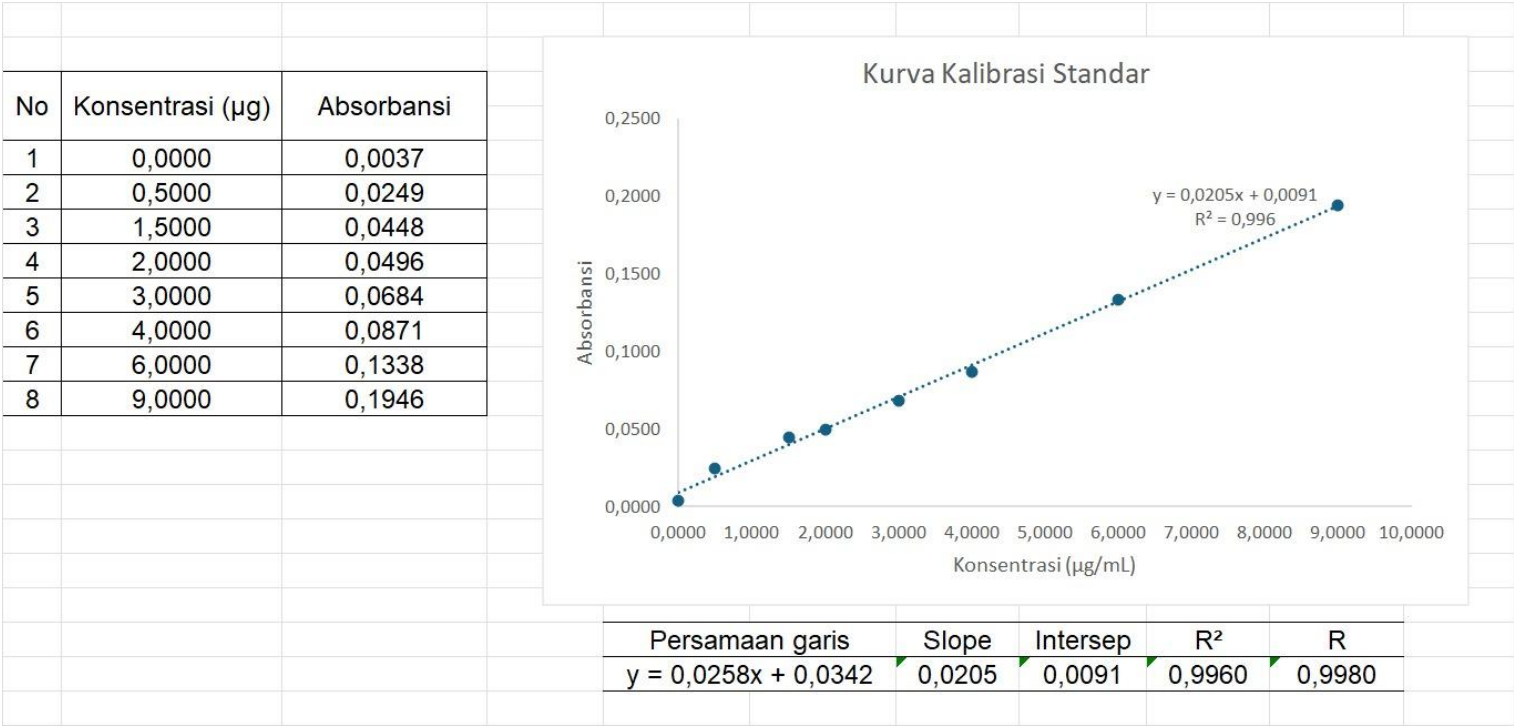


Pengukuran Absorbansi Sampel Udara
Ambien



Penimbangan Bahan Asam Sulfamat

Lampiran 5 Standar Kurva Kalibrasi



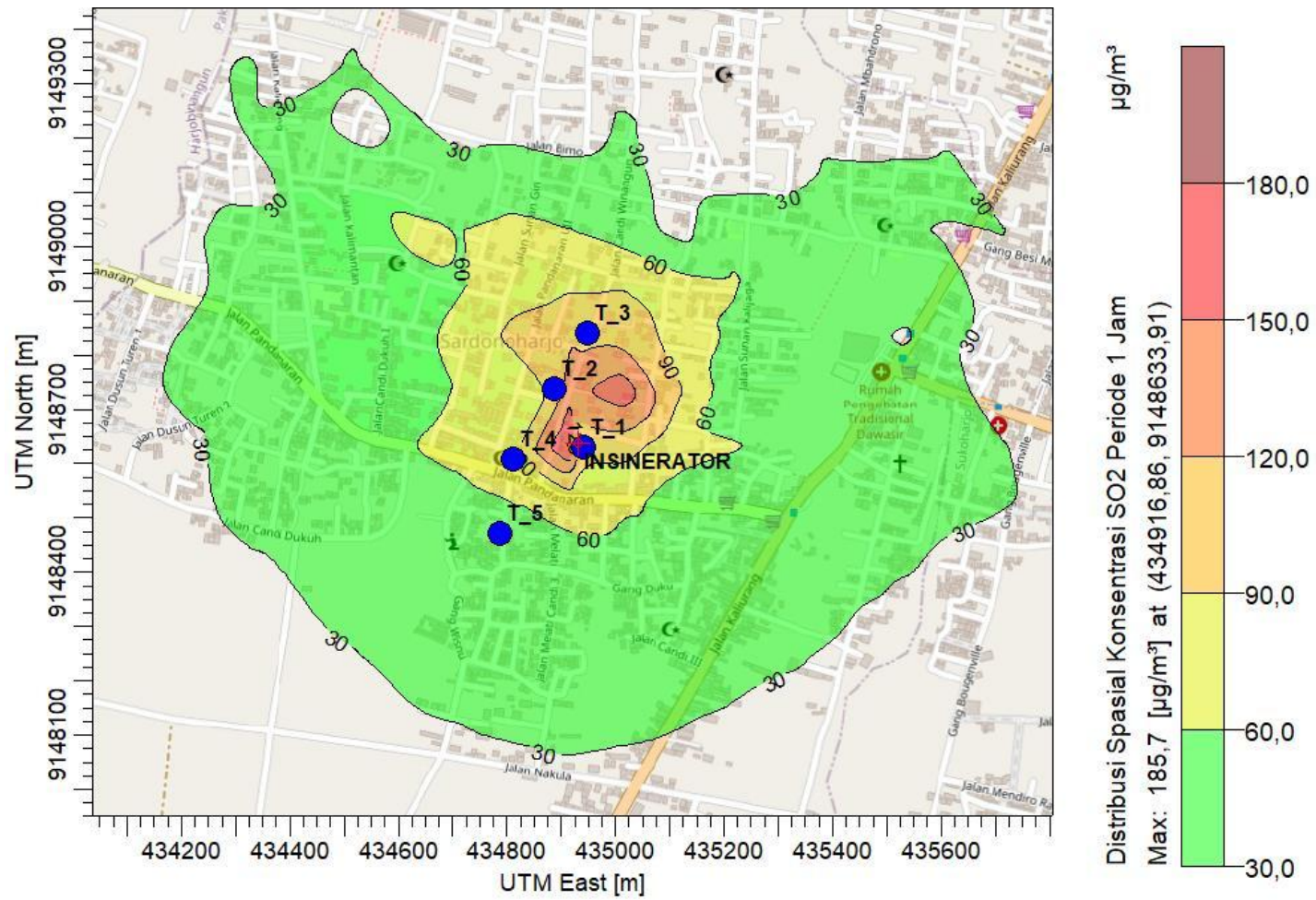
Lampiran 6 Hasil Pengukuran Sampel Udara Ambien

Titik 1 : TPS				Volume Udara							Konsentrasi SO2 di udara		
Sampel	Waktu	Lokasi	Titik Koordinat	y	x (a)	Qi	t	Pa	Ta	V	C	BM	Status
Pagi	07.00 - 08.00	TPS 3R Randu Alas, Candi Karang, Sardonoharjo	7°42'6.01"S, 110°24'35.86"E	0,048	1,893155	0,5	60	732,15	302,065	28,51173	66,39915	150	Memenuhi Baku Mutu
Siang	11.00 - 12.00			0,078	3,354092	0,5	60	731,1833	305,5167	28,15239	119,1406	150	Memenuhi Baku Mutu
Sore/Malem	17.00 - 18.00			0,058	2,380134	0,5	60	730,2167	301,25	28,51337	83,47429	150	Memenuhi Baku Mutu
*) y adalah absorbansi sampel				µg		l/min	menit	mmHg	Kelvin	Nm3	µg/Nm3	µg/m3 (1 jam)	
*) x adalah jumlah SO2 dari contoh uji (µg)													
*) BM adalah Baku Mutu Lampiran VII pada PP No. 22 Tahun 2021													
Titik 2 : Rumah Pak Aziz				Volume Udara							Konsentrasi SO2 di udara		
Sampel	Waktu	Lokasi	Titik Koordinat	y	x (a)	Qi	t	Pa	Ta	V	C	BM	Status
Pagi	07.00 - 08.00	Gg. Randu Alas 4, Jl. Candi Winangun, Sardonoharjo	7°42'2.91"S, 110°24'34.42"E	0,048	1,893155	0,5	60	729,85	302,85	28,34849	66,7815	150	Memenuhi Baku Mutu
Siang	11.00 - 12.00			0,071	3,013206	0,5	60	729,3333	307,25	27,92274	107,9123	150	Memenuhi Baku Mutu
Sore/Malem	17.00 - 18.00			0,053	2,136644	0,5	60	728,4333	301,7167	28,39974	75,23463	150	Memenuhi Baku Mutu
*) y adalah absorbansi sampel				µg		l/min	menit	mmHg	Kelvin	Nm3	µg/Nm3	µg/m3 (1 jam)	
*) x adalah jumlah SO2 dari contoh uji (µg)													
*) BM adalah Baku Mutu Lampiran VII pada PP No. 22 Tahun 2021													
Titik 3 : Rumah Pak RT				Volume Udara							Konsentrasi SO2 di udara		
Sampel	Waktu	Lokasi	Titik Koordinat	y	x (a)	Qi	t	Pa	Ta	V	C	BM	Status
Pagi	08.00 - 09.00	Candi Karang, Jl. Candi Winangun, Sardonoharjo	7°41'59.42"S, 110°24'36.39"E	0,041	1,552269	0,5	60	731,2333	304,5333	28,24523	54,95687	150	Memenuhi Baku Mutu
Siang	11.00 - 12.00			0,064	2,672321	0,5	60	729,7333	310,0333	27,68724	96,51814	150	Memenuhi Baku Mutu
Sore/Malem	17.00 - 18.00			0,057	2,331436	0,5	60	729,9833	301,25	28,50426	81,79253	150	Memenuhi Baku Mutu
*) y adalah absorbansi sampel				µg		l/min	menit	mmHg	Kelvin	L	µg/Nm3	µg/m3 (1 jam)	
*) x adalah jumlah SO2 dari contoh uji (µg)													
*) BM adalah Baku Mutu Lampiran VII pada PP No. 22 Tahun 2021													
Titik 4 : Pandanaran 1				Volume Udara							Konsentrasi SO2 di udara		
Sampel	Waktu	Lokasi	Titik Koordinat	y	x (a)	Qi	t	Pa	Ta	V	C	BM	Status
Pagi	07.00 - 08.00	Jl. Pandanaran No.60, Candi Winangun, Sardonoharjo	7°42'7.40"S, 110°24'31.60"E	0,043	1,649665	0,5	60	731,0833	301,3333	28,53932	57,80324	150	Memenuhi Baku Mutu
Siang	11.00 - 12.00			0,066	2,769717	0,5	60	730,2	306,65	28,01062	98,88094	150	Memenuhi Baku Mutu
Sore/Malem	17.00 - 18.00			0,054	2,185342	0,5	60	730,1833	300,6333	28,57056	76,48931	150	Memenuhi Baku Mutu
*) y adalah absorbansi sampel				µg		l/min	menit	mmHg	Kelvin	Nm3	µg/Nm3	µg/m3 (1 jam)	
*) x adalah jumlah SO2 dari contoh uji (µg)													
*) BM adalah Baku Mutu Lampiran VII pada PP No. 22 Tahun 2021													
Titik 5 : Rumah Pak Ngadi				Volume Udara							Konsentrasi SO2 di udara		
Sampel	Waktu	Lokasi	Titik Koordinat	y	x (a)	Qi	t	Pa	Ta	V	C	BM	Status
Pagi	07.00 - 08.00	Gg. Rambutan No.3, Candi Dukuh, Sardonoharjo	7°42'10.98"S, 110°24'31.46"E	0,034	1,211384	0,5	60	731,05	301,6167	28,51121	42,48799	150	Memenuhi Baku Mutu
Siang	11.00 - 12.00			0,048	1,893155	0,5	60	730,4167	308,3833	27,86145	67,9489	150	Memenuhi Baku Mutu
Sore/Malem	17.00 - 18.00			0,037	1,357478	0,5	60	729,7	301,45	28,4743	47,6738	150	Memenuhi Baku Mutu
*) y adalah absorbansi sampel				µg		l/min	menit	mmHg	Kelvin	Nm3	µg/Nm3	µg/m3 (1 jam)	
*) x adalah jumlah SO2 dari contoh uji (µg)													
*) BM adalah Baku Mutu Lampiran VII pada PP No. 22 Tahun 2021													

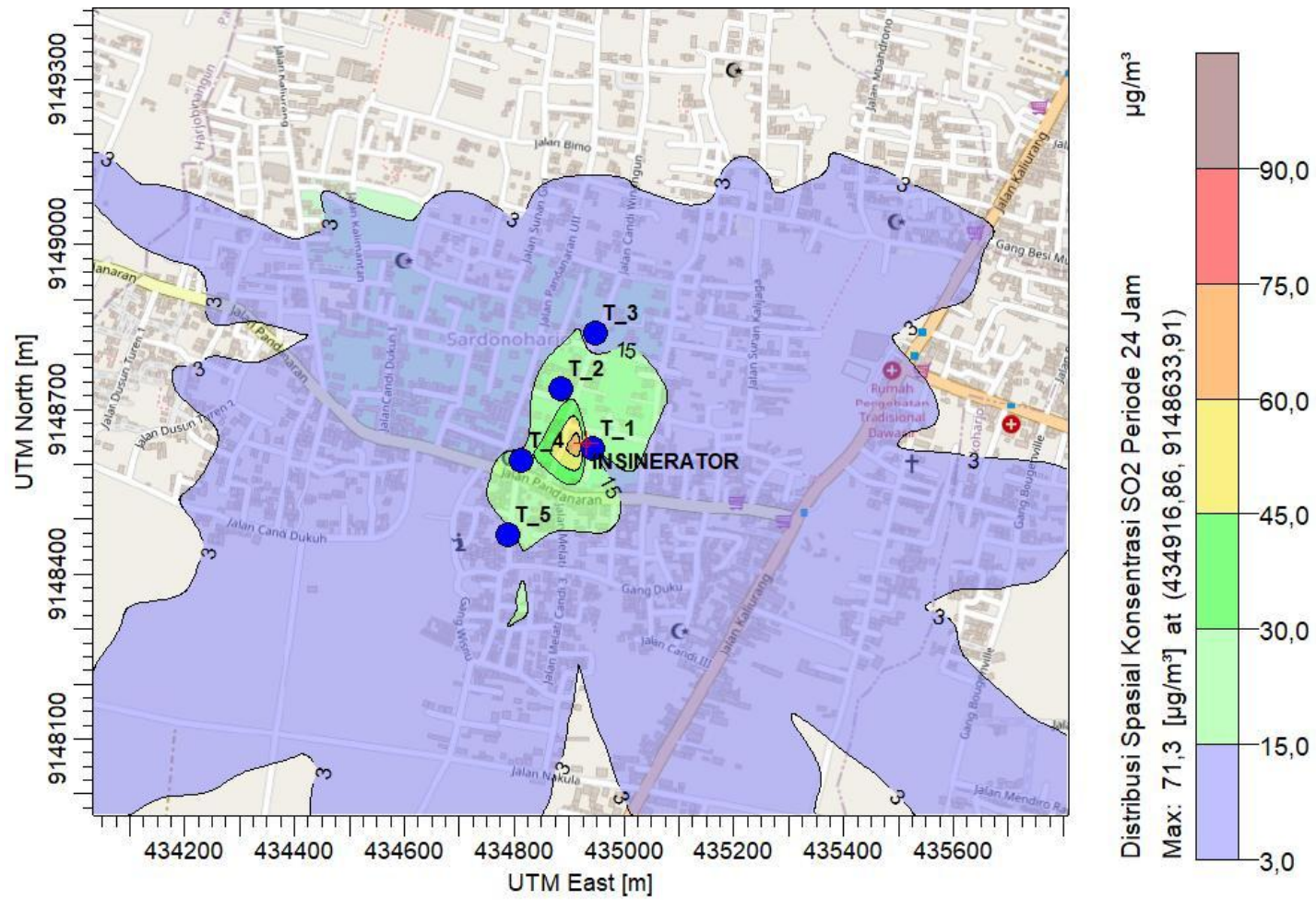
Lampiran 7 Hasil Perhitungan Emisi

Data emisi			Referensi
Konsentrasi SO ₂ terukur	3,875 ppm		perhitungan konversi so2 youtube
O ₂ terukur aktual	20,735%		konversi so2
O ₂ acuan (Permen LHK 70/2016)	11%		
Baku mutu SO ₂	210 mg/Nm ³		
Kondisi normal			
PV = nRT			
V/n = RT/P			
R	0,082 L atm / mol K		
T	25 °C		
	298,15 K		
Tekanan	1 atm		
volume molar gas pada 25 °C	24,4483 L/mol		
Konsentrasi SO₂			
C SO ₂ (Mr = 64)	10,143855 mg/Nm ³	*sebelum koreksi O ₂	
Konsentrasi SO ₂ terkoreksi	383,21228 mg/Nm ³	rumus di permen lhk 70 th 2016	
Status	Tidak Memenuhi		
Beban Emisi			
Kecepatan rerata cerobong	1,19 m/s		
Diameter cerobong	58 cm		
Luas penampang cerobong	0,2643143 m ²		
Debit operasi	0,3140676 m ³ /s	Jika suhu dan tekanan yang dipakai untuk konsentrasi sudah	
	0,3140676 Nm ³ /s	dikonversi ke mg/Nm ³ (25 °C, 1 atm),	
Beban Emisi	120,35455 mg/s	maka cukup anggap Q N ≈ Q op sehingga Q N ≈ 0,314 Nm³ /s.	
	0,120355 g/s		

Lampiran 8 Peta Isopleth Konsentrasi 1 Jam



Lampiran 9 Peta Isopleth Konsentrasi 24 Jam



Lampiran 10 Hasil Uji Validasi

Titik	Co (Observasi)	Cp (Prediksi)	1. Fractional Bias (FB)	2. Normalized Mean Square Error (NMSE)	3. Geometric Mean (MG)
T1	89,67	98,50	$\bar{C}_o$ 76,23294	Co - Cp (Co - Cp) ² NMSE	In Co In Cp In Co - In Cp MG
T2	83,31	93,78	$\bar{C}_p$ 86,05472	-8,83086 77,984014 0,03	4,496151 4,590079 -0,0939276 0,90
T3	77,76	107,44	FB -0,12104	-10,4737 109,69899	4,422562 4,540986 -0,1184235
T4	77,72	77,27	FB = 0 → model tidak bias.	-29,6868 881,30863	4,353574 4,676958 -0,3233838
T5	52,70	53,28	FB < 0 → model <i>overpredict</i> .	0,455547 0,2075228	4,35317 4,347292 0,0058783
rata-rata	76,23	86,05	FB > 0 → model <i>underpredict</i> .	-0,573 0,3283275	3,964683 3,975496 -0,0108134
				rata-rata 213,9055	rata-rata -0,108134
				Semakin kecil nilai NMSE → semakin baik (error makin kecil)	MG = 1 → model ideal (tidak bias).
				Ideal: NMSE ≈ 0	MG > 1 → <i>underprediction</i> .
					MG < 1 → <i>overprediction</i> .
FB = $\frac{(\bar{C}_o - \bar{C}_p)}{0.5(\bar{C}_o + \bar{C}_p)}$,	(1)		4. Geometric Variance (VG)	5. Koefisien Korelasi (R)*	6. Fraction of Predictions within a Factor of 2 (FAC2)
MG = $\exp(\ln \bar{C}_o - \ln \bar{C}_p)$,	(2)		In Co - In Cp VG	Co - $\bar{C}_o$ Cp - $\bar{C}_p$ (Co - Co)(Cp - Cp)	Cp/Co Cek kriteria %FAC 2
NMSE = $\frac{(\bar{C}_o - \bar{C}_p)^2}{\bar{C}_o \bar{C}_p}$,	(3)		-0,09393 0,008822 1,03	13,438394 12,44747 167,2741 0,84	1,09848 Memenuhi Memenuhi 100%
VG = $\exp[(\ln \bar{C}_o - \ln \bar{C}_p)^2]$,	(4)		-0,11842 0,014024	7,0765213 7,728474 54,69071	1,125721 Memenuhi Memenuhi
R = $\frac{(\bar{C}_o - \bar{C}_p)(C_p - \bar{C}_p)}{\sigma_{C_p} \sigma_{C_o}}$,	(5)		-0,32338 0,104577	1,5229071 21,38797 32,5719	1,381796 Memenuhi Memenuhi
FAC2 = fraction of data that satisfy	(6)		0,005878 3,46E-05	1,4915565 -8,78577 -13,1045	0,994139 Memenuhi Memenuhi
$0.5 \leq \frac{C_p}{C_o} \leq 2.0$,			-0,01081 0,000117	-23,52938 -32,7782 771,2497	1,010872 Memenuhi Memenuhi
where:			rata-rata 0,025515	rata-rata 202,5364	Semakin tinggi %FAC2 → model makin akurat.
Cp: model predictions,			VG = 1 → variabilitas ideal.	σ_{Co} 12,5606	Ideal: mendekati 100%.
Co: observations,			VG > 1 → hasil model memiliki	σ_{Cp} 19,09823	
overbar($\bar{C}$): average over the dataset, and			sebaran lebih besar terhadap		
σ_C : standard deviation over the dataset.			observasi.		
				$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$	

Lampiran 11 Tabel Metode *Estimating a Population Proportion with Specified Absolute Precision*

Table 1. Estimating a population proportion with specified absolute precision

$$n = z_{1-\alpha/2}^2 P(1-P)/d^2$$

(a) Confidence level **95%**

$P \backslash d$	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
0.01	1825	3457	4898	6147	7203	8067	8740	9220	9508	9604	9508	9220	8740	8067	7203	6147	4898	3457	1825
0.02	456	864	1225	1537	1801	2017	2185	2305	2377	2401	2377	2305	2185	2017	1801	1537	1225	864	456
0.03	203	384	544	683	800	896	971	1024	1056	1067	1056	1024	971	896	800	683	544	384	203
0.04	114	216	306	384	450	504	546	576	594	600	594	576	546	504	450	384	306	216	114
0.05	73	138	196	246	288	323	350	369	380	384	380	369	350	323	288	246	196	138	73
0.06	51	96	136	171	200	224	243	256	264	267	264	256	243	224	200	171	136	96	51
0.07	37	71	100	125	147	165	178	188	194	196	194	188	178	165	147	125	100	71	37
0.08	29	54	77	96	113	126	137	144	149	150	149	144	137	126	113	96	77	54	29
0.09	23	43	60	76	89	100	108	114	117	119	117	114	108	100	89	76	60	43	23
0.10	18	35	49	61	72	81	87	92	95	96	95	92	87	81	72	61	49	35	18
0.11	15	29	40	51	60	67	72	76	79	79	79	76	72	67	60	51	40	29	15
0.12	13	24	34	43	50	56	61	64	66	67	66	64	61	56	50	43	34	24	13
0.13	11	20	29	36	43	48	52	55	56	57	56	55	52	48	43	36	29	20	11
0.14	9	18	25	31	37	41	45	47	49	49	49	47	45	41	37	31	25	18	9
0.15	8	15	22	27	32	36	39	41	42	43	42	41	39	36	32	27	22	15	8
0.20	5	9	12	15	18	20	22	23	24	24	24	23	22	20	18	15	12	9	5
0.25	*	6	8	10	12	13	14	15	15	15	15	15	14	13	12	10	8	6	*

* Sample size less than 5.

Table 1

Lampiran 12 Kuesioner Masyarakat untuk Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan

KUESIONER ANALISIS RISIKO KESEHATAN LINGKUNGAN (ARKL)

Paparan Sulfur Dioksida (SO₂) di Sekitar TPS3R Randu Alas

**) Kuesioner ini bertujuan untuk keperluan penelitian akademik. Semua data bersifat rahasia dan hanya digunakan untuk kepentingan ilmiah.*

**) Silakan berikan tanda pada kotak yang menurut anda jawaban yang tepat.*

A. IDENTITAS RESPONDEN

1. Nama responden (inisial saja) :
2. Usia (tahun) :
3. Jenis kelamin : ☐ Laki-laki
☐ Perempuan
4. Berat badan (kg) : kg
**Misal: 50 kg atau 60 kg*
5. Lama tinggal di lokasi ini : tahun
**Misal: 10 tahun atau 20 tahun*

B. KARAKTERISTIK TEMPAT TINGGAL & PAJANAN

6. Jarak rumah ke TPS3R Randu Alas : ☐ kurang dari 50 meter
☐ 50 – 100 meter
☐ 100 – 200 meter
☐ lebih dari 200 meter
7. Apakah Anda sering mencium bau asap dari arah TPS3R? : ☐ Tidak pernah
☐ Jarang
☐ Kadang-kadang
☐ Sering
8. Waktu paling sering mencium bau asap: : ☐ Pagi
☐ Siang
☐ Sore
☐ Malam

C. AKTIVITAS HARIAN (UNTUK PARAMETER PAJANAN)

9. Rata-rata waktu Anda berada di rumah : jam
dalam sehari **Misal: 8 jam atau 12 jam*
Dari jam berapa sampai jam berapa? : jam s/d jam
10. Aktivitas utama sehari-hari : ☐ Sebagian besar di rumah
☐ Bekerja di luar rumah
☐ Campuran (di rumah & luar rumah)
11. Apakah jendela/ventilasi rumah sering : ☐ Ya
dibuka? ☐ Tidak

D. KELUHAN KESEHATAN (PENDUKUNG, TIDAK UNTUK DIAGNOSIS)

12. Apakah Anda sering mengalami batuk : ☐ Tidak pernah
dalam beberapa waktu terakhir? ☐ Jarang
☐ Sering
13. Apakah Anda pernah merasa sesak napas? : ☐ Tidak pernah
☐ Jarang
☐ Sering
14. Apakah Anda atau anggota keluarga : ☐ Ya
memiliki riwayat asma? ☐ Tidak
15. Apakah ada penyakit pernapasan lain yang :
sering anda rasakan?

Lampiran 13 Pengaturan Grid Reseptor (*Receptor Grid*) pada Model AERMOD untuk Analisis ARKL

Receptor Pathway

Model: AERMOD

- Receptor Options
 - Receptor Summary
 - Terrain Options (Elevated)
- Grids
 - Uniform Cartesian**
 - Non-Uniform Cartesian
 - Uniform Polar
 - Non-Uniform Polar
 - Multi-Tier
 - Nested
- Discrete Receptors
 - Discrete Cartesian
 - Discrete Polar
 - Discrete ARC
- Fenceline
 - Cart. Plant Boundary
 - Polar Plant Boundary
 - Fenceline Grid

Uniform Cartesian Grid Receptor Network

Network ID: UCART1

Actions

	X Axis	Y Axis
SW Coordinates [m]:	434035,24	9147720,42
Center Coordinates [m]:	434935,24	9148620,42
No. of Points:	4	4
Spacing [m]:	600	600
Length [m]:	1800,00	1800,00

Source...

Terrain Elevations # Receptors: 16 Flagpole Heights

List [X] [Left] [Right] [1/1] [New]

Help Previous Next Close

- Pemodelan dispersi menggunakan AERMOD dilakukan dengan pendekatan *Uniform Cartesian Grid*, dengan jarak antar reseptor (*spacing*) sebesar 600 meter dan jumlah titik reseptor sebanyak 4×4 dalam domain sepanjang 1.800 meter pada masing-masing arah sumbu (X dan Y). Konfigurasi ini menghasilkan total 16 titik reseptor yang digunakan untuk merepresentasikan distribusi spasial konsentrasi SO_2 di wilayah studi. Jarak antar titik yang seragam memungkinkan pemodelan menangkap gradien konsentrasi secara sistematis dari sumber emisi ke area sekitarnya.
- Nilai konsentrasi SO_2 pada masing-masing zona diperoleh menggunakan pendekatan *nearest receptor*, yaitu dengan mengambil nilai konsentrasi dari titik reseptor AERMOD yang paling merepresentasikan area dalam zona tersebut. Pendekatan ini digunakan untuk menjaga konsistensi antara hasil pemodelan dan pembagian zona dalam analisis risiko. Nilai konsentrasi yang diperoleh kemudian digunakan sebagai input dalam perhitungan *Risk Quotient* (RQ) untuk masing-masing kelompok usia.

Lampiran 14 Hasil Konsentrasi SO₂ Periode 1 Jam sebagai Input Analisis Risiko pada Grid ARKL

Plot File Grid View												
Select Plot File: C:\Users\mhammi\Downloads\Running Final\Running Final\Mod\Final Run\Final Run.AD\01H1GALL.PLT												
PLOT FILE OF HIGH 1ST HIGH 1-HR VALUES FOR SOURCE GROUP: ALL												
#	Discrete Receptor ID (Group Name)	X	Y	Concentration (AVERAGE CONC) [ug/m ³]	Elevation (ZELEV)	Hill Heights (ZHILL)	Flagpole (ZFLAG)	Averagi... (AVE)	Source Gro... (GRP)	Rank	Net ID	Date (DATE(CON))
1		434035,24	9147720,42	14,39223	259,60	259,60	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	03/05/2025 24 hr
2		434635,24	9147720,42	17,26452	260,30	260,30	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	11/09/2025 20 hr
3		435235,24	9147720,42	18,88957	260,50	260,50	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	10/04/2025 19 hr
4		435835,24	9147720,42	15,51525	265,80	265,80	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	15/06/2025 05 hr
5		434035,24	9148320,42	19,15222	271,00	271,00	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	12/10/2025 21 hr
6		434635,24	9148320,42	36,8983	274,40	274,40	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	11/05/2025 22 hr
7		435235,24	9148320,42	36,85039	275,20	275,20	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	25/05/2025 05 hr
8		435835,24	9148320,42	19,77011	276,80	276,80	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	16/05/2025 20 hr
9		434035,24	9148920,42	24,37264	289,30	289,30	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	29/11/2025 04 hr
10		434635,24	9148920,42	49,35958	294,80	294,80	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	08/11/2025 23 hr
11		435235,24	9148920,42	58,31731	297,10	297,10	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	23/10/2025 20 hr
12		435835,24	9148920,42	23,54071	298,60	298,60	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	11/11/2025 02 hr
13		434035,24	9149520,42	22,76246	302,50	302,50	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	31/10/2025 24 hr
14		434635,24	9149520,42	8,5847	312,00	312,00	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	31/10/2025 23 hr
15		435235,24	9149520,42	8,25684	313,90	313,90	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	12/04/2025 22 hr
16		435835,24	9149520,42	7,23123	314,80	314,80	1,50	1-HR	ALL	1ST	UCART1	11/11/2025 19 hr
17 T		434942,00	9148630,00	98,50219	287,01	287,01	1,50	1-HR	ALL	1ST		30/11/2025 01 hr
18 T		434886,00	9148738,00	93,78319	291,28	291,28	1,50	1-HR	ALL	1ST		10/09/2025 06 hr
19 T		434947,00	9148840,00	107,44269	295,51	295,51	1,50	1-HR	ALL	1ST		12/04/2025 18 hr
20 T		434812,00	9148608,00	77,26895	287,01	287,01	1,50	1-HR	ALL	1ST		09/05/2025 21 hr
21 T		434788,00	9148472,00	53,27656	281,95	281,95	1,50	1-HR	ALL	1ST		06/05/2025 22 hr

Lampiran 15 Hasil Konsentrasi SO₂ Periode 24 Jam sebagai Input Analisis Risiko pada Grid ARKL

Plot File Grid View												
Select Plot File: C:\Users\mhamm\Downloads\Running Final\Running Final\Mod\Final Run\Final Run.AD\24H1GALL.PLT												
PLOT FILE OF HIGH 1ST HIGH 24-HR VALUES FOR SOURCE GROUP: ALL												
#	Discrete Receptor ID (Group Name)	X	Y	Concentration (AVERAGE CONC) [ug/m³]	Elevation (ZELEV)	Hill Heights (ZHILL)	Flagpole (ZFLAG)	Averagi... (AVE)	Source Gro... (GRP)	Rank	Net ID	Date (DATE(CON)
1		434035,24	9147720,42	1,47407	259,60	259,60	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	11/05/2025 24 hr
2		434635,24	9147720,42	4,06267	260,30	260,30	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	10/05/2025 24 hr
3		435235,24	9147720,42	2,73534	260,50	260,50	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	10/04/2025 24 hr
4		435835,24	9147720,42	2,55805	265,80	265,80	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	14/06/2025 24 hr
5		434035,24	9148320,42	2,77542	271,00	271,00	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	12/05/2025 24 hr
6		434635,24	9148320,42	5,89421	274,40	274,40	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	08/05/2025 24 hr
7		435235,24	9148320,42	6,72098	275,20	275,20	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	14/06/2025 24 hr
8		435835,24	9148320,42	2,33874	276,80	276,80	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	22/04/2025 24 hr
9		434035,24	9148920,42	1,5863	289,30	289,30	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	19/10/2025 24 hr
10		434635,24	9148920,42	7,07829	294,80	294,80	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	08/11/2025 24 hr
11		435235,24	9148920,42	7,45451	297,10	297,10	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	23/10/2025 24 hr
12		435835,24	9148920,42	2,01644	298,60	298,60	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	11/11/2025 24 hr
13		434035,24	9149520,42	1,53856	302,50	302,50	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	08/11/2025 24 hr
14		434635,24	9149520,42	0,49095	312,00	312,00	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	02/11/2025 24 hr
15		435235,24	9149520,42	0,77611	313,90	313,90	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	08/04/2025 24 hr
16		435835,24	9149520,42	0,59285	314,80	314,80	1,50	24-HR	ALL	1ST	UCART1	04/03/2025 24 hr
17 T		434942,00	9148630,00	14,76864	287,01	287,01	1,50	24-HR	ALL	1ST		29/11/2025 24 hr
18 T		434886,00	9148738,00	21,67325	291,28	291,28	1,50	24-HR	ALL	1ST		09/11/2025 24 hr
19 T		434947,00	9148840,00	10,79917	295,51	295,51	1,50	24-HR	ALL	1ST		01/12/2025 24 hr
20 T		434812,00	9148608,00	22,40908	287,01	287,01	1,50	24-HR	ALL	1ST		04/08/2025 24 hr
21 T		434788,00	9148472,00	13,21255	281,95	281,95	1,50	24-HR	ALL	1ST		06/05/2025 24 hr

RIWAYAT HIDUP



Hamel Farid lahir di Jakarta pada tanggal 10 September 2004 sebagai anak kedua dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Leonardo Hamisie dan Ibu Enti Randini. Penulis dibesarkan di Bekasi dan menempuh pendidikan dasar hingga menengah atas di wilayah Jakarta dan Bekasi.

Pendidikan formal dimulai di SD Islam Tahfidz Ath-Thooriq dan lulus pada tahun 2016. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di SMPQ Al Ihsan dan menyelesaikannya pada tahun 2019. Pendidikan menengah atas ditempuh di SMA Future Gate dan lulus pada tahun 2022. Pada tahun yang sama, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai kegiatan akademik maupun non-akademik. Penulis tergabung dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Hafiz Hafizah UII (HAWASI) serta *Society of Renewable Energy* (SRE UII). Selain itu, penulis juga aktif dalam kegiatan himpunan mahasiswa dan kepanitiaan di tingkat jurusan.

Dalam bidang akademik, penulis beberapa kali terlibat sebagai asisten laboratorium, asisten dosen, serta terlibat dalam kegiatan penelitian dosen. Penulis juga aktif mengikuti kegiatan karya tulis ilmiah dan Program Kreativitas Mahasiswa (PKM). Adapun prestasi yang pernah diraih antara lain Juara 3 Lomba Research Poster dan Juara 1 Lomba Non-Akademik *Mobile Legends* tingkat mahasiswa.

Selama proses pendidikan, penulis memiliki minat khusus pada bidang kualitas air dan kualitas udara, yang kemudian menjadi fokus dalam pengembangan kompetensi akademik serta penyusunan tugas akhir.