

TESIS

**ANALISIS GAS SULFUR DIOKSIDA (SO₂) dan NITROGEN
DIOKSIDA (NO₂) dari CEROBONG
PT. HUADI NICKEL ALLOY INDONESIA**

*Analysis of Sulfur Dioxide (SO₂) and Nitrogen Dioxide (NO₂) Gases
from PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia*

**ZUMIRRAH
D092201002**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK LINGKUNGAN
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN TESIS

ANALISIS GAS SULFUR DIOKSIDA (SO₂) dan NITROGEN DIOKSIDA (NO₂) dari CEROBONG PT. HUADI NICKEL ALLOY INDONESIA

Tesis
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Teknik Lingkungan

Disusun dan diajukan oleh

**ZUMIRRAH
D092201002**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

TESIS

ANALISIS GAS SULFUR DIOKSIDA (SO₂) DAN NITROGEN DIOKSIDA (NO₂) DARI CEROBONG PT. HUADI NICKEL ALLOY INDONESIA

ZUMIRRAH
D092201002

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Lingkungan Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 24 Oktober 2023

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Ir. Hj. Sumarni Hamid Aly, M.T., IPU
NIP. 195812281986012001

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

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Ketua Program Studi
S2 Teknik Lingkungan



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., IPM., ASEAN.Eng.
NIP. 197309262000121002

Dr. Roslinda Ibrahim, S.P., M.T
NIP. 197506232015042001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : **ZUMIRRAH**
Nomor Mahasiswa : D092201002
Program Studi : Teknik Lingkungan

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul **“Analisis Gas Sulfur Dioksida (SO₂) dan Nitrogen Dioksida (NO₂) dari Cerobong PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia”** adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi penasehat (**Prof. Dr. Ir. Hj. Sumarni Hamid Aly, M.T.** sebagai Pembimbing Utama dan **Dr. Eng. Ir. Muralia Hustim, ST., M.T.** sebagai Pembimbing Pendamping). Karya Ilmiah belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari tesis ini telah dipublikasikan di **Jurnal Internasional Scopus Q3 (Journal of Biomechanical Science and Engineering, ISSN 1880-9863, Volume 18, Nomor 07)** sebagai artikel dengan judul **“Analysis of Sulfur Dioxide (SO₂) and Nitrogen Dioxide (NO₂) Gases from PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia.”**

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 5 Desember 2023

Yang menyatakan



Zumirrah

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kepada Allah *Subhanahu Wata'ala* atas izin-Nya sehingga penulisan mengusulkan penelitian tesis dengan judul “*Analisis Gas Sulfur Dioksida (SO₂) dan Nitrogen Oksida (NO_x) dari Cerobong PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia*” dapat terselesaikan dengan tepat waktu. Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang begitu besar kepada Ibu **Prof. Dr. Ir. Hj. Sumarni Hamid Aly, M.T** selaku Pembimbing Utama dan ibu **Dr. Eng. Ir. Muralia Hustim, ST., M.T** selaku Pembimbing Pendamping yang telah banyak memberikan waktu, gagasan dan pengetahuan serta dorongan semangat dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan penelitian tesis ini.

Terakhir, ucapan terima kasih kepada ibu dan ayah beserta saudara-saudara, dan teman-teman penulis atas bantuan, nasihat, dan motivasi yang diberikan selama penyusunan penelitian tesis ini. Penulis menyadari dalam penulisan proposal tesis ini masih jauh dari sempurna, dan banyak kekurangan baik dalam metode penulisan maupun dalam pembahasan materi. Hal tersebut dikarenakan keterbatasan kemampuan Penulis.

Penulis juga mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun mudah-mudahan di kemudian hari dapat memperbaiki segala kekurangannya. Penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat utamanya bagi penulis sendiri dan bagi pengembangan ilmu pengetahuan pada umumnya.

Penulis,

Zumirrah

ABSTRAK

ZUMIRRAH. *Analisis Gas Sulfur Dioksida (SO₂) dan Nitrogen Dioksida (NO₂) dari Cerobong PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia* (dibimbing oleh **Sumarni Hamid Aly** dan **Muralia Hustim**).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pola sebaran dan tingkat konsentrasi polutan SO₂ dan NO₂ yang bersumber dari cerobong asap PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia. Metode analisis penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif. Tingkat konsentrasi polutan SO₂ dan NO₂ PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia masing-masing berkisar antara 9 - 98 mg/Nm³ dan 290 - 730 mg/Nm³ dengan model pola sebaran polutan SO₂ dan NO₂ adalah dominan mengarah ke Timur hingga Utara. Konsentrasi kedua polutan menurun dengan bertambahnya waktu dan jarak sehingga kualitas udara berdasarkan Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) di area PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia berstatus Tidak Sehat sedangkan di lokasi pemukiman Desa Papanloe Kecamatan Pajukukang Kabupaten Bantaeng berstatus Baik.

Kata kunci : SO₂ dan NO₂, Model Pola Sebaran, ISPU.

ABSTRACT

ZUMIRRAH. *Analysis of Sulfur Dioxide (SO₂) and Nitrogen Dioxide (NO₂) Gases from PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia* (guided by **Sumarni Hamid Aly** and **Muralia Hustim**).

This study aims to determine the dispersion patterns and concentration levels of SO₂ and NO₂ pollutants originating from the smokestacks of PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia. The research analysis method employed in this study is quantitative descriptive method. As the result concentration levels of SO₂ and NO₂ pollutants from PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia range between 9 - 98 mg/Nm³ and 290 - 730 mg/Nm³ respectively, with the dispersion pattern model of SO₂ and NO₂ pollutants predominantly oriented towards the East to North. Both pollutants' concentrations decrease with time and distance, therefore air quality based on the Air Pollution Index (ISPU) in the PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia area being classified as Unhealthy, while the residential area in Papanloe Village, Pajukukang District, Bantaeng Regency, is classified is Good.

Keywords: SO₂ and NO₂, Dispersion Pattern Models, ISPU.

DAFTAR ISI

TESIS.....	i
PENGAJUAN TESIS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA.....	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Penelitian	5
1.4. Manfaat Penelitian	5
1.5. Batasan Masalah	5
1.6. Sistematika Penulisan	6
BAB II.....	7
TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Pencemaran Udara	7
2.2. Sumber Pencemaran Industri	11
2.3. PT Huadi Nickel Alloy Indonesia.....	12
2.4. Sumber Emisi dan Neraca Massa Bahan Baku PT. Huadi Nickel-Alloy Indonesia.....	14
2.5. Sulfur Dioksida (SO ₂) dan Dampaknya.....	18
2.6. Nitrogen Oksida (NO _x) dan Dampaknya	20
2.7. Pengambilan Sampel Kualitas Udara.....	21
2.8. Metode Pengambilan Contoh Uji Emisi	23
2.9. Dispersi Polutan Gaussian	23
2.10. WRPLOT.....	26
2.11. SCREEN View.....	27
2.12. AERMET	28
2.13. AERMAP.....	29
2.14. AERMOD	30
2.15. Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU)	35
BAB III	44
METODOLOGI PENELITIAN	44

3.1. Rancangan Penelitian	44
3.2. Waktu dan Lokasi Penelitian	44
3.3. Alat dan Bahan.....	46
3.4. Teknik Pengumpulan Data.....	47
3.5. Pemodelan Sebaran Emisi	56
3.6. WRPLOT	56
3.7. AERMET	57
3.8. AERMAP	58
3.9. AERMOD	58
3.10. Analisis Perhitungan Indeks Standar Pencemaran Udara (SPU).....	61
3.11. Alur Penelitian	62
BAB IV	64
HASIL DAN PEMBAHASAN	64
4.1. Gambaran Umum Lokasi Penelitian.....	64
4.2. Identifikasi Spesifikasi Sumber Emisi	64
4.3. Kondisi Meteorologi	66
4.4. Topografi.....	72
4.5. Analisis AERMOD	75
4.6. Dampak Pola Sebaran Berdasarkan ISPU	98
BAB IV	100
PENUTUP.....	100
5.1. Kesimpulan	100
5.2. Saran	100
DAFTAR PUSTAKA	101
LAMPIRAN.....	104

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 1. Tipe keputulan dari suatu cerobong (a) looping (b) cooning (c) fanning.....	9
GAMBAR 2. Flowsheet pengolahan biji nikel menjadi ferronickel (Biro Perencanaan).....	13
GAMBAR 3. Neraca Massa Kegiatan Pabrik Pengolahan Dan Pemurnian Nikel PT. Huadi Nickel-Alloy Indonesia Tahap 0	16
GAMBAR 4. Neraca Massa Kegiatan Pabrik Pengolahan Dan Pemurnian Nikel PT. Huadi Nickel-Alloy Indonesia Tahap 1A	17
GAMBAR 5. Neraca Massa Kegiatan Pabrik Pengolahan Dan Pemurnian Nikel PT. Huadi Nickel-Alloy Indonesia Tahap 1B	17
GAMBAR 6. Neraca Massa Kegiatan Pabrik Pengolahan Dan Pemurnian Nikel PT. Huadi Nickel-Alloy Indonesia Tahap 2	18
GAMBAR 7. Model sebaran polutan dari sumber titik berdasarkan sebaran gauss	25
GAMBAR 8. Mawar angin (NOAA, 2010)	26
GAMBAR 9. Interface AERMET	28
GAMBAR 10. Interface AERMAP.....	29
GAMBAR 11. Interface AERMOD	31
GAMBAR 12. Kerangka Pikir Penelitian	43
GAMBAR 13. Peta Lokasi Penelitian.....	45
GAMBAR 14. Titik Pengambilan Contoh Uji.....	48
GAMBAR 15. Contoh titik-titik lintas pada cerobong berbentuk lingkaran	49
GAMBAR 16. Contoh Penentuan Titik-Titik Lintas Pengukuran Pada Irisan Cerobong Bentuk Persegi Panjang Atau Bentuk Persegi.....	50
GAMBAR 17 Rangkaian peralatan pengambil contoh uji SO ₂	51
GAMBAR 18. Rangkaian peralatan pengambil contoh uji NO _x	53
GAMBAR 19. Flowchart Pengolahan WRPLOT	56
GAMBAR 20. Flowchart Pengolahan AERMET	57
GAMBAR 21. Flowchart Pengolahan AERMAP	58
GAMBAR 22. Flowchart Pengolahan AERMOD	59
GAMBAR 23. Alur Penelitian	63
GAMBAR 24. Grafik Distribusi Rata-Rata Curah Hujan Bulanan (2013-2022) ..	67
GAMBAR 25. Grafik Distribusi Rata-Rata Suhu Bulanan (2013-2022).....	68
GAMBAR 26. Grafik Distribusi Rata-Rata Kelembapan Bulanan (2013-2022)..	69
GAMBAR 27. Windrose (2013-2022)	71
GAMBAR 28. Distribusi Frekuensi Kecepatan Angin 2013-2022.....	72
GAMBAR 29. Kondisi Topografi Lokasi Penelitian	74
GAMBAR 30. Isopleth SO ₂ Rata-Rata 1 Jam.....	80
GAMBAR 31. Isopleth SO ₂ Rata-Rata 24 Jam.....	81

GAMBAR 32. Isopleth SO ₂ Rata-Rata Tahunan	82
GAMBAR 33. Isopleth NO ₂ Rata-Rata 1 Jam	83
GAMBAR 34. Isopleth NO ₂ Rata-Rata 24 Jam	84
GAMBAR 35. Isopleth NO ₂ Rata-Rata Tahunan	85
GAMBAR 36. Titik Konsentrasi Maksimal Pola Sebaran SO ₂	87
GAMBAR 37. Titik Konsentrasi Maksimal Pola Sebaran NO ₂	88
GAMBAR 38. Grafik Tingkat Konsentrasi SO ₂ Rata-Rata 1 Jam Terhadap Jarak Berdasarkan Arah Mata Angin.....	91
GAMBAR 39. Grafik Tingkat Konsentrasi SO ₂ Rata-Rata 24 Jam Terhadap Jarak Berdasarkan Arah Mata Angin.....	91
GAMBAR 40. Grafik Tingkat Konsentrasi SO ₂ Rata-Rata Tahunan Terhadap Jarak Berdasarkan Arah Mata Angin	92
GAMBAR 41. Grafik Tingkat Konsentrasi NO ₂ Rata-Rata 1 Jam Terhadap Jarak Berdasarkan Arah Mata Angin.....	93
GAMBAR 42. Grafik Tingkat Konsentrasi NO ₂ Rata-Rata 24 Jam Terhadap Jarak Berdasarkan Arah Mata Angin.....	93
GAMBAR 43. Grafik Tingkat Konsentrasi NO ₂ Rata-Rata Tahunan Terhadap Jarak Berdasarkan Arah Mata Angin	94
GAMBAR 44. Titik Reseptor Sekitar Lokasi Studi.....	97

DAFTAR TABEL

TABEL 1. Unsur kimia lapisan atmosfer berdasarkan perbedaan suhu.....	7
TABEL 2. Parameter dan baku mutu udara ambien.....	8
TABEL 3. Klasifikasi Stabilitas Atmosfer pada Pagi-Malam Hari	11
TABEL 4. Efek SO ₂ terhadap kesehatan manusia	19
TABEL 5. Matriks Penelitian Terdahulu	37
TABEL 6. Kebutuhan Peralatan dan Bahan Setiap Kegiatan	46
TABEL 7. Pedoman penentuan titik-titik lintas pengukuran untuk cerobong dengan irisan melintang berbentuk lingkaran	49
TABEL 8. Pedoman penentuan titik-titik lintas pengukuran pada irisan cerobong bentuk persegi panjang atau bentuk persegi.....	50
TABEL 9. Tabel Konversi Nilai Konsentrasi SO ₂ dan NO ₂ ISPU	62
TABEL 10. Kategori Angka Rentan ISPU.....	62
TABEL 11. Spesifikasi Cerobong PT. Huadi Nickel-Alloy Indonesia.....	65
TABEL 12. Curah Hujan Rata-Rata Bulanan	67
TABEL 13. Suhu Rata-Rata Bulanan.....	68
TABEL 14. Kelembapan Rata-Rata Bulanan.....	69
TABEL 15. Data Distribusi Angin Setiap Bulan	71
TABEL 16. Hasil Pengukuran Konsentrasi Emisi PT. Huadi Nickel-Alloy Indonesia	75
TABEL 17. Penentuan Laju Emisi Emisi SO ₂ dan NO _x PT. Huadi Nickel-Alloy Indonesia	77
TABEL 18. Parameter Masukan Model.....	78
TABEL 19. Luasan Sebaran Konsentrasi SO ₂ dan NO ₂ Setiap Periode Waktu Rata-Rata	89
TABEL 20. Lokasi Konsentrasi Maksimum SO ₂ dan NO ₂	89
TABEL 21. Konsentrasi Hasil Pemodelan SO ₂ Setiap Periode Rata-Rata Waktu Terhadap Jarak Setiap Arah Mata Angin.....	90
TABEL 22. Konsentrasi Hasil Pemodelan SO ₂ Setiap Periode Rata-Rata Waktu Terhadap Jarak Setiap Arah Mata Angin.....	92
TABEL 23. Titik Lokasi Studi	96
TABEL 24. Konsentrasi Hasil Simulasi Terhadap Reseptor	96
TABEL 25. Kualitas Udara Ambien Maksimal Hasil Pemodelan AERMOD Berdasarkan ISPU	98
TABEL 26. Kualitas Udara Ambien Rata-Rata Hasil Pemodelan AERMOD Berdasarkan ISPU Pada Desa Papanloe	99

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1. Hasil Pengujian Emisi	105
LAMPIRAN 2. Windrose	119
LAMPIRAN 3. Pola Sebaran	132
LAMPIRAN 4. Spesifikasi Cerobong	139
LAMPIRAN 5. Dokumentasi Sampling	143
LAMPIRAN 6. Data Output	146
LAMPIRAN 7. Pengolahan Data AERMET dan AERMOD	154
LAMPIRAN 8. Perhitungan ISPU	163

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia sebagai kawasan padat industri merupakan salah satu sektor yang sangat berpotensi dalam meningkatkan pertumbuhan ekonomi dan pemerataan lapangan kerja (Cahyono, 2011) yang ditandai adanya peningkatan jumlah Produk Domestik Bruto (PDB) sejak tahun 2019 sebesar 19,63%. Sektor industri dapat memberikan dampak negatif terhadap lingkungan yakni sebagai penyumbang zat pencemaran udara yang sampai saat ini belum memiliki solusi yang efektif terkait pengendalian emisi tersebut (Purba, 2020). Adanya emisi yang dihasilkan dari suatu usaha atau kegiatan khususnya dalam skala industri tentunya dapat mengancam kelangsungan hidup dan kerusakan lingkungan sehingga menjadi masalah yang sangat mengkhawatirkan (Abidin, 2019).

Sejak tahun 2018, jumlah desa atau kelurahan yang terpapar zat pencemar udara meningkat sebanyak 265 desa atau kelurahan yang ada di Sulawesi Selatan (BPS, 2022) dan berdasarkan hasil perhitungan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) yang dilakukan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Ditjen Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan Hidup Direktorat Pengendalian Pencemaran Udara tahun 2019 menyatakan bahwa kualitas udara daerah Sulawesi Selatan termasuk dalam kategori sedang. Dalam mengendalikan zat pencemar udara ambien tersebut yakni masih memerlukan suatu upaya agar kualitas udara di daerah provinsi Sulawesi Selatan dapat mencapai kategori baik.

Paparan polusi udara mulai dari konsentrasi rendah hingga konsentrasi tinggi di daerah perkotaan, pedesaan dan kawasan industri sering tidak disadari. Hal tersebut dikarenakan jarang pemantauan dampak emisi yang dihasilkan dari suatu kegiatan atau usaha yang dilakukan oleh pelaku usaha atau masyarakat setempat (Mijling, 2019). Sementara itu, pemantauan dampak emisi harus dilakukan bagi tiap industri sesuai dengan PermenLHK No. 14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 tentang Indeks Pencemaran Udara dijelaskan bahwa dalam melindungi dan mengelola lingkungan hidup maka

pemantauan kualitas udara ambien bagi setiap industri yang menghasilkan emisi perlu diterapkan guna mengurangi tingkat risiko kesehatan manusia dan kerusakan lingkungan lainnya.

Emisi yang dihasilkan oleh suatu kegiatan atau usaha, selain dampaknya terhadap pencemaran udara juga dapat menyebabkan gangguan kesehatan terhadap manusia melalui paparan yang berulang kali serta dapat menyebabkan dampak kerusakan lainnya terhadap lingkungan sekitar (Eviane, 2020). Penyebab pencemaran udara akibat faktor eksternal yang disebabkan oleh kegiatan manusia melalui proses pembakaran bahan bakar fosil dari kegiatan industri dapat menghasilkan beberapa jenis emisi yang berdampak buruk terhadap lingkungan maupun kesehatan manusia diantaranya yakni gas sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x). Paparan gas SO_2 dalam jangka panjang, dapat mengganggu fungsi paru-paru serta dapat menyebabkan iritasi sistem pernapasan lainnya (Yunita, 2017). Sedangkan peningkatan kadar NO_x udara ambien dalam setiap tahunnya, juga dapat menyebabkan keluhan kesehatan seperti batuk, mata merah dan mata terasa perih (Darmawan, 2018). Industri smelter menjadi salah satu penyebab kerusakan lingkungan akibat senyawa polutan yang dihasilkan yakni senyawa NO_x , SO_2 , SO_2^{3+} , H_2SO_4 , debu dan H_2S yang dapat menurunkan kualitas udara serta dapat meningkatkan konsentrasi zat pencemar di atmosfer (Kramawijaya, 2017).

SO_2 (Sulfur dioksida) dan NO_2 (Nitrogen dioksida) adalah dua polutan udara utama yang berasal dari aktivitas manusia, terutama dari pembakaran bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, dan gas alam. PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia menggunakan batubara sebagai bahan bakar untuk operasional pengolahan bijih nikel. Kedua gas ini memiliki dampak negatif pada kesehatan manusia dan lingkungan, sehingga memantau dan mengelolanya menjadi penting. Dasar pemilihan parameter SO_2 dan NO_2 untuk dipantau dan dikelola karena mempertimbangkan beberapa faktor seperti Kesehatan manusia, lingkungan, regulasi lingkungan, polusi udara dan efek rumah kaca. Selain itu, dua parameter ini merupakan parameter wajib di pantau khusus pada kegiatan pertambangan sumber emisi pengolahan biji nikel dan telah tercantum pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. 4 tahun 2014 tentang

Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Usaha dan/atau kegiatan Pertambangan.

SO₂ dan NO₂ dapat menyebabkan masalah pernapasan dan kesehatan lainnya pada manusia. Paparan jangka pendek terhadap gas-gas ini dapat menyebabkan iritasi pada saluran pernapasan, batuk, sesak napas, dan bahkan serangan asma. Paparan jangka panjang dapat meningkatkan risiko terjadinya penyakit paru-paru kronis, seperti bronkitis dan emfisema. Oleh karena itu, pemantauan dan pengelolaan SO₂ dan NO₂ diperlukan untuk melindungi kesehatan masyarakat. SO₂ dan NO₂ dapat berkontribusi pada polusi udara dan pencemaran lingkungan. Ketika gas-gas ini bereaksi dengan udara dan uap air, mereka dapat membentuk asam belerang (H₂SO₄) dan asam nitrat (HNO₃), yang kemudian dapat jatuh sebagai hujan asam. Hujan asam dapat merusak ekosistem, termasuk tanaman, danau, sungai, dan hutan. Pemantauan dan pengelolaan SO₂ dan NO₂ membantu memahami dan mengurangi dampak polusi terhadap lingkungan. Pemerintah telah mengatur batas emisi SO₂ dan NO₂ untuk industri. Pemantauan gas-gas ini penting untuk memastikan bahwa perusahaan dan kendaraan mematuhi regulasi tersebut. Pemantauan yang baik juga memungkinkan identifikasi sumber polusi yang signifikan dan tindakan perbaikan yang diperlukan untuk mengurangi emisi. Pemantauan SO₂ dan NO₂ merupakan bagian dari upaya yang lebih luas untuk meningkatkan kualitas udara. Data pemantauan digunakan untuk mengevaluasi keberhasilan kebijakan dan tindakan mitigasi yang diimplementasikan. Dengan pemantauan yang efektif, perencanaan lingkungan dapat disusun untuk mengurangi emisi dan meningkatkan kualitas udara di daerah yang terpapar tinggi.

Untuk mengantisipasi kemungkinan terjadinya hal-hal buruk yang disebabkan oleh industri smelter, maka dari itu diperlukan suatu pemodelan distribusi sebaran emisi dalam menentukan kualitas udara sekitar. Analisis ini akan membentuk hubungan antara emisi terhadap wilayah kependudukan dan pertanian yang terkena dampak akibat emisi yang keluar dari cerobong industri smelter Bantaeng. Pemantauan kualitas udara juga dapat mendukung salah satu tujuan *Sustainable Development Goal's (SDGs)* ditahun 2030 yakni memastikan kesehatan dan mendukung kesejahteraan bagi semua manusia. Dengan demikian, pemantauan tersebut dapat direalisasikan dalam aplikasi AERMOD

menggunakan model dispersi berbasis *Gaussian American Meteorological Society / Environmentak Protection Agency Regulatory Model (AERMOD)* yang merupakan salah satu *software* yang dapat memodelkan sebaran polutan dengan biaya yang rendah serta dapat memberikan informasi terkait arah, jarak dan konsentrasi sebaran polutan hingga beberapa kilometer dari sumber emisi berdasarkan kondisi klimatologi wilayah (Mijling, 2019). Aplikasi model ini menggunakan data meteorologi dan data emisi yang sifatnya lebih efisien dalam memprediksikan sebaran polutan. Metode ini pun dapat digunakan untuk mengembangkan strategi pengendalian manajemen kualitas udara dari suatu kegiatan atau usaha yang menghasilkan suatu emisi atau zat pencemar udara (Kumar, 2021).

Dalam mendukung program manajemen kualitas udara demi melindungi manusia, hewan, tanaman dan material dari paparan polusi udara serta permasalahan lingkungan dan dampak lainnya akibat polusi yang keluar dari cerobong industri PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia maka dari itu peneliti tertarik melakukan suatu penelitian mengenai pola sebaran dan konsentrasi emisi yang dihasilkan cerobong smelter guna meminimalisir dampak pencemaran lingkungan serta dampak kesehatan manusia melalui pemantauan kualitas udara menggunakan suatu model *Gaussian plume* sederhana berbasis kelas stabilitas dari stasiun meteorologi lokal dan hasil prakiraan konsentrasi melalui model tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran konsentrasi emisi SO_2 dan NO_x yang dilakukan secara langsung di lapangan berdasarkan arah dan kecepatan angin yang digambarkan oleh *windrose*.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Seberapa besar konsentrasi emisi SO_2 dan NO_x yang bersumber dari cerobong emisi PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia di Kawasan Industri Bantaeng ?
2. Bagaimana pola sebaran dan konsentrasi emisi SO_2 dan NO_2 yang dihasilkan cerobong PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia di Kawasan Industri Bantaeng menggunakan model AERMOD ?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis tingkat konsentrasi emisi SO_2 dan NO_x yang bersumber dari cerobong emisi PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia di Kawasan Industri Bantaeng.
2. Memprediksi model sebaran dan tingkat konsentrasi emisi SO_2 dan NO_2 yang dihasilkan cerobong emisi PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia di Kawasan Industri Bantaeng menggunakan model AERMOD.

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sebagai sumber informasi terkait pola, arah dan konsentrasi sebaran emisi yang dihasilkan cerobong smelter nikel kawasan industri Bantaeng.
2. Sebagai sumber informasi terkait konsentrasi emisi yang dihasilkan cerobong smelter nikel kawasan industri Bantaeng.
3. Model yang dihasilkan dapat dijadikan sebagai arahan dan sumber informasi kepada kawasan industri Bantaeng khususnya PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia dalam mengantisipasi dampak negatif yang dapat ditimbulkan dari emisi gas buang dan juga dapat dijadikan sebagai sumber informasi bagi masyarakat.

1.5. Batasan Masalah

Adapun batasan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini yaitu emisi SO_2 dan NO_2 .
2. Data primer yang mendukung pemodelan ini yaitu data hasil pengukuran emisi dan udara ambien, jenis bahan bakar yang digunakan, tinggi cerobong, diameter cerobong, suhu gas, kecepatan gas keluar, debit emisi gas, laju emisi, titik koordinat cerobong dan elevasi.
3. Data sekunder yang mendukung penelitian ini yaitu data meteorologi seperti data arah angin, kecepatan angin, tutupan awan, *dry bulb*

temperature, kelembaban, tekanan, *celling height*, curah hujan per jam dan data *global horizontal radiation*.

4. Luasan wilayah studi dalam Penelitian ini pada radius 2.5 km (5 km x 5km).

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini menyajikan informasi tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan, manfaat dan batasan masalah serta sistematika penulisan penelitian.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memberikan informasi mengenai uraian dan pengertian, teori-teori dari berbagai literatur dan kerangka berpikir,

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menyajikan terkait metode yang akan dilakukan dalam penelitian ini serta prosedur atau langkah-langkah analisis data yang akan dilakukan oleh penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pencemaran Udara

Udara merupakan suatu campuran gas yang terdapat pada lapisan yang mengelilingi bumi. Udara atau atmosfer juga diartikan sebagai suatu kesatuan ruang yang terdiri dari makhluk hidup yang ada di dalamnya. Udara yang normal pada lapisan troposfer terdiri dari 78% nitrogen, 20% oksigen, 0,93% argon, 0,03% karbon monoksida dan sisanya terdiri dari neon, helium, metana dan hidrogen. Lapisan troposfer merupakan lapisan yang paling mudah tercemar. Udara dikatakan tercemar apabila terjadi perubahan terhadap komposisi kandungan udara normal yang ditandai adanya penambahan gas lain (Hastutiningrum, 2018).

Atmosfer bumi terdiri dari beberapa lapisan yaitu lapisan troposfer, stratosfer, mesosfer dan termosfer. Berdasarkan perbedaan suhu dari setiap lapisan atmosfer maka kandungan unsur kimia dari setiap lapisan atmosfer juga berbeda, hal ini dapat di lihat pada tabel 1 adalah sebagai berikut :

TABEL 1. Unsur kimia lapisan atmosfer berdasarkan perbedaan suhu

Lapisan	Suhu (°C)	Altitud (km)	Unsur kimia Utama
Troposfer	15 sampai -56	0 – 11	N ₂ , O ₂ , CO ₂
Stratosfer	-56 sampai -2	11 – 50	H ₂ O
Mesosfer	-2 sampai -92	50 – 85	O ₃
Thermosfer	-92 sampai 1200	85 – 100	O ₂ , O, NO

Sumber : Soemirat, 2011

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, pencemaran udara diartikan sebagai masuknya atau dimasukkannya zat, energi dan/atau komponen lainnya ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu udara ambien yang telah ditetapkan. Pencemaran udara dapat berlangsung secara alamiah melalui asap kebakaran hutan, akibat gunung berapi, debu meteorit, pancaran garam dari laut dan pencemaran udara akibat aktivitas manusia yang terjadi melalui transportasi, pembuangan sampah dan kegiatan industri (Ratnani, 2008).

Tingkat pencemaran udara diketahui berdasarkan standar kualitas udara yang dikenal sebagai baku mutu udara yang dapat diartikan bahwa apabila kualitas udara mendekati atau memenuhi persyaratan seperti yang telah ditetapkan dalam baku mutu, maka tidak akan menyebabkan suatu kerusakan atau kerugian yang diakibatkan oleh udara tersebut. Adapun komponen zat pencemar dan baku mutu udara berdasarkan PP Nomor 22 Tahun 2021 di jabarkan pada Tabel 2 adalah sebagai berikut:

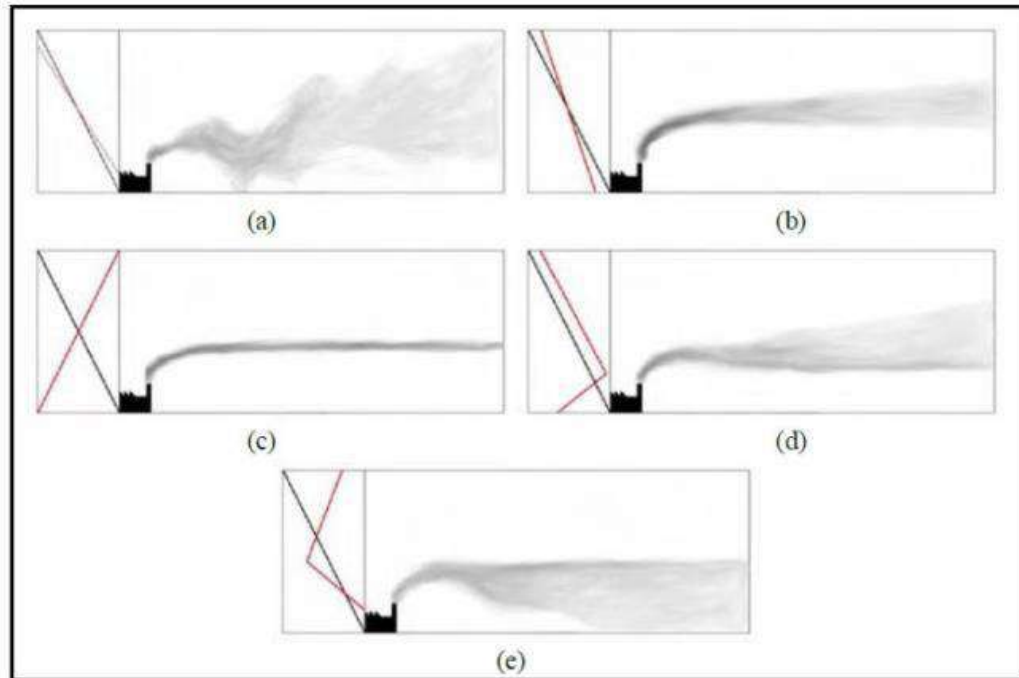
TABEL 2. Parameter dan baku mutu udara ambien

No.	Parameter	Waktu Pengukuran	Baku Mutu
1.	Sulfur Dioksida (SO ₂)	1 jam	150 µg/m ³
		24 jam	75 µg/m ³
		1 tahun	45 µg/m ³
2.	Karbon Monoksida (CO)	1 jam	10000 µg/m ³
		8 jam	4000 µg/m ³
3.	Nitrogen Dioksida (NO ₂)	1 jam	200 µg/m ³
		24 jam	65 µg/m ³
		1 tahun	50 µg/m ³
4.	Oksidan fotokimia (O _x) sebagai Ozon (O ₃)	1 jam	150 µg/m ³
		8 jam	100 µg/m ³
		1 tahun	35 µg/m ³
5.	Hidrokarbon non Metana (NMHC)	3 jam	160 µg/m ³
6.	Partikulat debu < 100 µm (TSP)	24 jam	230 µg/m ³
	Partikulat debu < 10 µm (PM ₁₀)	24 jam	75 µg/m ³
		1 tahun	40 µg/m ³
	Partikulat debu < 2,5 µm (PM _{2,5})	24 jam	55 µg/m ³
		1 tahun	15 µg/m ³
7.	Timbal (Pb)	24 jam	2 µg/m ³

Sumber : PP No 22 Tahun 2021, Lampiran VII.

Faktor yang mempengaruhi pencemaran udara yaitu sumber emisi dan atmosfer lokal. Sumber emisi diartikan sebagai tempat keluarnya zat pencemar dengan berbagai karakteristik yang berbeda-beda seperti bentuk, luas dan tinggi lubang keluarnya zat pencemar ke atmosfer, jenis bahan bakar yang digunakan kecepatan gas keluar cerobong serta laju emisi. Akan tetapi faktor lain yang dapat mempengaruhi pencemaran udara di atmosfer yaitu stabilitas atmosfer. Dimana stabilitas atmosfer merupakan ukuran dari kecenderungan atmosfer dalam mencegah ataupun menghalangi gerak vertikal yang secara langsung berkorelasi dengan berbagai jenis sistem cuaca (Sosaidi, 2020).

Stabilitas atmosfer dapat mempengaruhi bentuk keputan dari suatu cerobong. Pada umumnya, bentuk keputan cerobong dapat dilihat pada Gambar sebagai berikut :



GAMBAR 1. Tipe keputan dari suatu cerobong (a) *looping* (b) *coning* (c) *fanning*

Berdasarkan Gambar 1 di atas, maka jenis keputan asap berdasarkan kondisi stabilitas atmosfer yaitu :

1. *Looping plume*

Looping plume terjadi saat suhu atmosfer menurun akibat ketinggian ketika udara di sekitarnya basah atau lembap (*lapse rate*), atmosfer didominasi struktur olakan atau pusaran udara yang relatif besar disertai terjadinya perbedaan kepadatan pada udara (konveksi bebas).

2. *Coning plume*

Terjadi pada siang atau malam hari pada semua musim, karakteristik atmosfer berangin atau berawan pada kondisi stabil mendekati netral, tidak terdapat turbulensi yang dapat menyebabkan atmosfer mengalami olakan (pusaran udara kecil) yang ditimbulkan oleh gesekan serta tidak adanya penguatan vertikal dari kondisi udara yang stabil, maka penyebaran vertikal dan lateral dari keputan hampir sama sehingga keputan berbentuk kerucut simetris.

3. *Fanning plume*

Dicirikan sebagai atmosfer yang sangat stabil (terdapat proses inversi suhu). Kondisi idealnya terjadi pada daerah anti siklon (daerah dengan sirkulasi angin berskala besar dengan tekanan atmosfer yang tinggi) terutama pada malam hari serta tipe kepulan ini berpotensi menjadi bentuk kepulan yang lebih berbahaya.

4. *Lofting plume*

Tipe *lofting* merupakan jenis kepulan dengan kondisi dispersi kontaminan yang paling baik (terjadinya campuran satu zat dengan zat lainnya). Umumnya, tipe ini terjadi pada petang hari ketika terjadi inversi radiasi serta lapisan stabil di bawah kepulan tersebut dapat menghalangi pergerakan kepulan ke bawah dan lapisan atas yang kurang stabil mengakibatkan kepulan terdispersi ke atas. Hal tersebut terjadi jika inversinya tinggi atau melebihi tinggi efektif cerobong maka kepulan akan berubah menjadi *fanning*.

5. *Fumigation*

Fumigasi merupakan kondisi kebalikan dari *lofting*, dimana fumigasi yang mengalami proses inversi di atas kepulan dapat menghalangi dispersi ke atas serta menyebabkan penurunan suhu di bawah inversi mengakibatkan terjadinya pencampuran vertikal sehingga kepulan akan turun ke permukaan tanah (Aly, 2018)

Kondisi atmosfer selalu mengalami perubahan setiap saat, hal tersebut di sebabkan oleh beberapa faktor (Nurrohmah, 2016). Kecepatan angin dan radiasi matahari yang berubah-ubah sangat berpengaruh terhadap kelas stabilitas atmosfer dimana kecepatan angin dalam penelitian ini merupakan salah satu parameter utama dalam memodelkan suatu sebaran polutan yang terjadi pada cerobong industri. Kelas stabilitas pasquil merupakan kelas stabilitas yang paling sering digunakan dimana kelas stabilitas tersebut terdiri dari 6 kelas yakni stabilitas atmosfer A (sangat tidak stabil), B (sedang), C (sedikit tidak stabil), D (netral), E (agak sedikit stabil), F (stabil). Adapun klasifikasi kelas stabilitas atmosfer pada pagi sampai malam hari disajikan pada tabel 3 adalah sebagai berikut :

TABEL 3. Klasifikasi Stabilitas Atmosfer pada Pagi-Malam Hari

μ (m/s)	Siang			Malam	
	Radiasi Matahari			Sifat Awan	
	Kuat	Sedang	Kecil	($\geq 4/8$) Berawan	($\geq 4/8$) Cerah
< 2	A	A – B	B	E	F
2 - 3	A – B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	C	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Sumber : Assegaf, 2018.

2.2. Sumber Pencemaran Industri

Sumber pencemaran udara yang disebabkan oleh kegiatan industri tergantung dari jenis industrinya, prosesnya serta peralatan industri dan utilitas. Klasifikasi terbentuknya zat pencemaran udara berdasarkan kejadiannya dibedakan atas pencemaran primer dan pencemaran sekunder. Pencemaran primer yakni zat pencemarnya diemisikan langsung dari sumbernya sedangkan pencemaran sekunder terbentuk melalui adanya reaksi dari suatu senyawa dengan berbagai zat yang ada di udara. Secara kimiawi, zat pencemar udara terdiri dari beberapa senyawa akan tetapi zat pencemar udara yang menjadi perhatian khusus yakni golongan oksida karbon (CO, CO₂), oksida belerang (SO₂, SO₃) dan oksida nitrogen (N₂O, NO, NO₃), senyawa hasil reaksi dari fitokimia, partikel (asap, debu, asbestos, metal, minyak, garam sulfat), senyawa *inorganic* (HF, H₂S, NH₃, H₂SO₄, HNO₃), hidrokarbon (CH₄, C₄H₁₀), unsur radio aktif (titanium, radon) serta energi panas (suhu dan kebisingan) (Ratnani, 2008).

Sumber pencemar yang dihasilkan oleh industri yang keluar dari cerobong sebagai sumber emisi hasil pembakaran berupa limbah yakni gas NO₂, SO₂, CO, CO₂, partikulat (debu) serta PM₁₀ yang dapat mencemari lingkungan sekitar (Setiawan, 2012). Polutan utama yang dihasilkan dari suatu cerobong yakni gas SO₂ yang bersumber dari kandungan senyawa sulfur (S) dari hasil pembakaran batu bara (Ramadhan, 2017). Batu bara merupakan bahan bakar fosil yang paling banyak digunakan oleh suatu industri sehingga sebagian besar sulfur akan diemisikan sebagai sulfur dioksida (SO₂) (Nuning, 2006).

Sumber pencemar udara yang berasal dari kegiatan industri yang dikenal sebagai sumber titik yang terdiri dari :

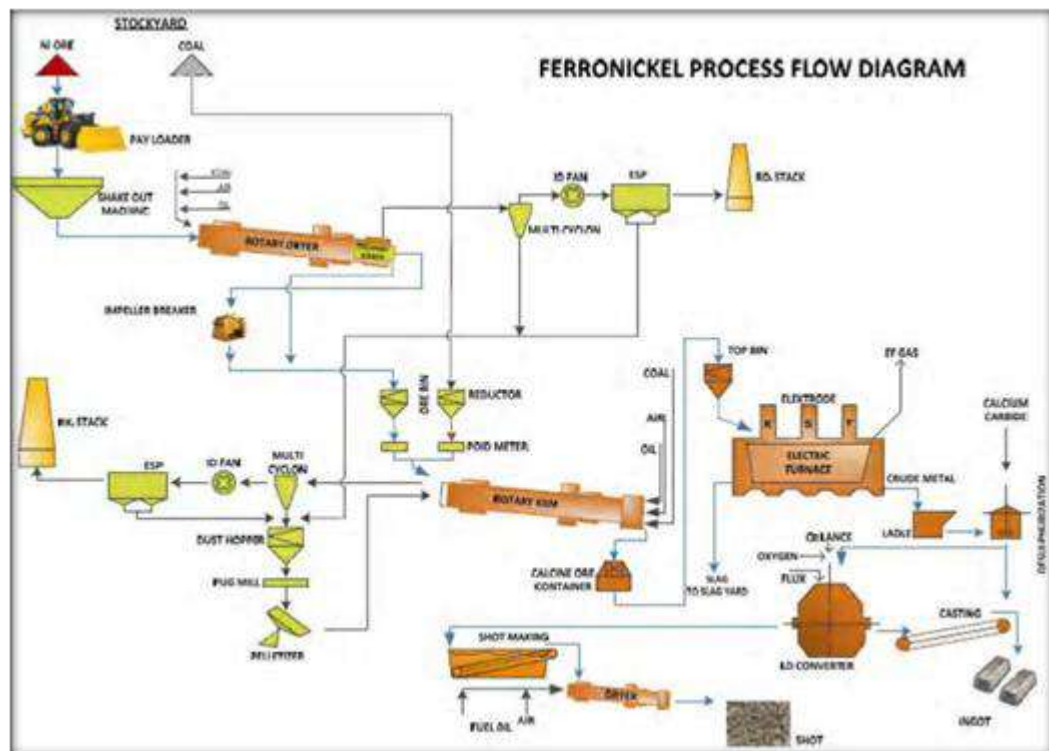
- Emisi normal berasal dari sumber-sumber terkontrol yang dihasilkan oleh suatu cerobong sehingga besaran emisinya dapat di ukur ataupun dipantau.
- Emisi abnormal berasal dari sumber-sumber titik kecil, dimana sumber emisi abnormal sangat sulit dikontrol ataupun di ukur.
- Emisi sementara atau aksidental berasal dari kebocoran dan tumpahan kecil, suatu ledakan ataupun kebakaran (Cahyono, 2011).

2.3. PT Huadi Nickel Alloy Indonesia

Indonesia merupakan salah satu negara dengan deposit nikel yang sangat besar yakni sebesar 16.200 MT nikel dengan biji bertipe *lateric* yang merupakan jenis logam yang sangat penting dan dijadikan sebagai infrastruktur modern, sehingga produksi nikel terus dilakukan demi memenuhi kebutuhan nikel dunia (Kramawijaya, 2017).

PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia adalah perusahaan pengolahan dan pemurnian nikel yang berada di kabupaten Bantaeng, Sulawesi Selatan yang didirikan sejak tahun 2014 dan dibangun di atas lahan seluas 50 hektar yang berada di kecamatan Pajukukang, Kabupaten Bantaeng yang merupakan bagian dari Kawasan Industri Bantaeng. *Nickel ore* (biji nikel) sebagai bahan baku dalam pemurnian nikel yang menghasilkan produk berupa *ferronickel*. Saat ini PT. Huadi Nickel Alloy memiliki dua tungku yang dapat menghasilkan 150 metrik ton per hari dan 4.200 metrik ton setiap bulan atau 50.000 metrik ton setiap tahun.

Ferronickel berbentuk batangan dengan kandungan nikel sebesar 10-15% selebihnya itu ialah senyawa Fe (besi). Produk *ferronickel* yang dihasilkan PT. Huadi Nicel Alloy ini di kemudian di pasarkan di negara Shanghai Tiongkok.



GAMBAR 2. Flowsheet pengolahan biji nikel menjadi ferronickel (Biro Perencanaan)

Tahapan proses pengolahan biji nikel menjadi *ferronickel* berdasarkan Gambar 2 di atas adalah sebagai berikut :

1. Proses pengeringan (*drying*)

Proses pengeringan merupakan proses tahapan awal dalam pengolahan biji nikel yang dilakukan menggunakan alat *rotary dryer*. Umumnya sumber panas yang digunakan dalam proses ini yakni menggunakan bahan bakar dari minyak residu yang disemprotkan dari arah ujung dan samping alat pengering.

2. Proses reduksi (*reduction*)

Selah proses pengeringan dengan kadar air 20%. Bijih nikel kemudian diumpan ke dalam *rotary kiln* untuk direduksi. Pada tahap awal, kadar air bijih nikel akan berkurang menjadi nol persen. Kemudian bijih nikel akan mengalami proses reduksi yang akan mengonversi bijih nikel oksida menjadi logam nikel dan logam besi. Bahan pereduksi dalam proses ini yaitu gas CO dan H₂ (gas hidrogen). Gas reduktor ini dihasilkan dari proses pembakaran tidak sempurna dari minyak residu. Pada tahap ini dilakukan penambahan batu bara dan di akhir proses ditambahkan sulfur cair. Proses reduksi ini menghasilkan produk yang

disebut *calcine* yang selanjutnya akan mengalami proses peleburan menggunakan *electric furnace* atau tungku listrik.

3. Proses peleburan (*smelting*)

Pada tahapan ini, *calcine* akan dilebur di dalam tungku lebur yang disebut alat *electric furnace*. *Calcine* dilebur menjadi *ferronickel* yang memiliki kualitas tertentu. Selain itu, pada tahap ini juga dihasilkan *slag* (zat pengotor).

4. Proses *converting* (pemurnian)

Proses *converting* merupakan proses peningkatan kadar *ferronickel* melalui alat *electric furnace*. Dimana kadar *ferronickel* naik setelah proses *converting* sedangkan kadar besinya turun. Pada tahapan proses ini, dilakukan penambahan udara dan silika sebagai fluks dan bahan imbuhan.

5. Proses granulasi (*granulating*)

Proses granulasi merupakan tahapan akhir dari pengolahan biji nikel menjadi *ferronickel*. Pada proses ini, *ferronickel* disemprotkan dengan air bertekanan tertentu dan akan membeku membentuk granul-granul atau partikel-partikel.

2.4. Sumber Emisi dan Neraca Massa Bahan Baku PT. Huadi Nickel-Alloy Indonesia

Penurunan kualitas lingkungan hidup dapat disebabkan oleh tiga faktor yaitu, jumlah manusia, jumlah sumber daya alam, dan dampak lingkungan dari sumber daya alam yang digunakan. Salah satu contoh penurunan kualitas lingkungan hidup dapat dilihat dari kualitas udaranya. Udara menjadi faktor yang penting dalam kehidupan, namun seiring perkembangan teknologi dan meningkatnya pembangunan kota, kualitas udara telah banyak mengalami perubahan.

Perubahan yang terjadi pada kualitas udara tersebut merupakan akibat dari pencemaran udara yaitu masuknya zat pencemar (berbentuk gas – gas dan partikel kecil/aerosol) ke dalam udara. Zat pencemar masuk ke dalam udara dapat terjadi secara alamiah seperti asap kebakaran hutan, akibat gunung berapi, debu meteorit, dan pancaran garam dari laut. Selain itu, zat pencemar juga dapat bersumber dari aktivitas manusia seperti transportasi, industri, dan pembuangan sampah. Emisi

pencemaran udara dari sumber industri sangat tergantung dari jenis industri dan prosesnya, peralatan industri dan utilitasnya yang digunakan.

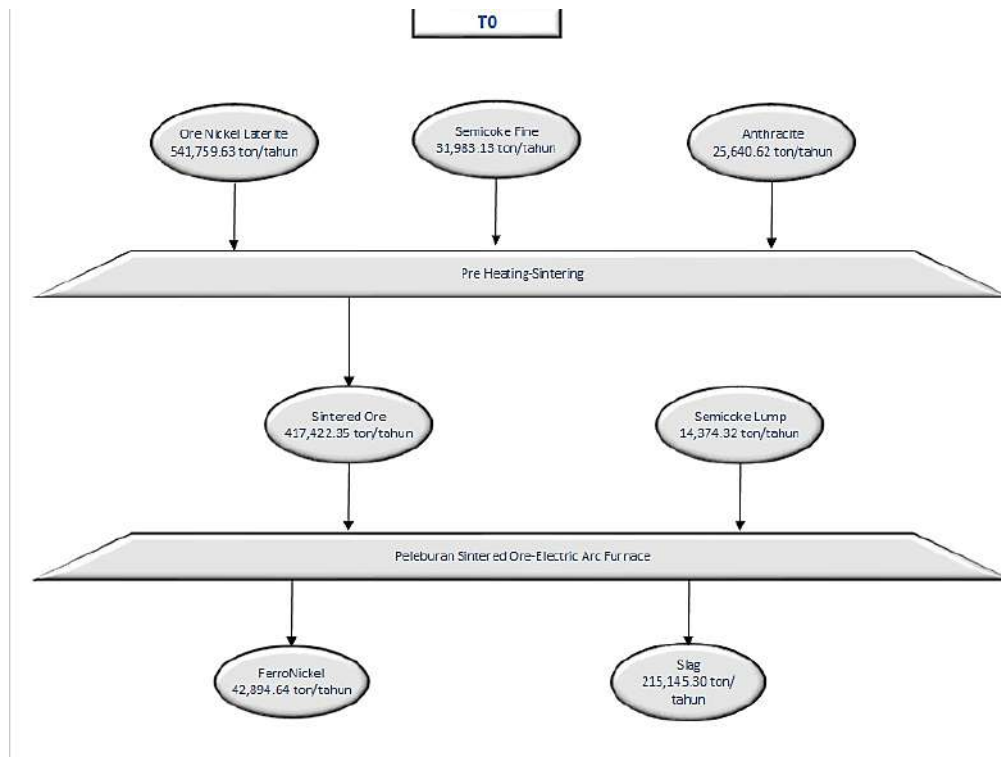
PT. Huadi Nickel-Alloy Indonesia adalah salah perusahaan industri peleburan nikel laterit untuk memproduksi Feronikel (FeNi) yang berlokasi pada Kabupaten Bantaeng, Provinsi Sulawesi Selatan. Pada kegiatan produksi tersebut memerlukan pemanasan yang menggunakan dengan bahan bakar batu bara. Proses peleburan nikel akan menghasilkan produk samping berupa emisi yang dikeluarkan melalui cerobong. Umumnya, emisi yang dikeluarkan mengandung bahan pencemar berupa partikulat (debu), ataupun berupa gas seperti NO_x, (NO dan NO₂), SO₂, CO, CO₂ serta komponen lainnya. Emisi yang dikeluarkan dari cerobong baik yang berupa partikulat maupun gas merupakan emisi yang dapat mencemari udara sekitarnya. Adapun jenis dan konsentrasi bahan pencemar yang ada di emisi ini sangat dipengaruhi oleh jenis bahan bakar yang digunakan. Sumber emisi yang dapat timbul dari kegiatan PT. Huadi Nickel-Alloy Indonesia dapat berasal dari emisi kendaraan, emisi cerobong saat proses produksi, dan emisi fugitif yang dapat timbul saat operasional dilakukan. Emisi fugitif dapat berasal dari IPAL, stok yard, dan lain sebagainya. Namun pada kajian teknis emisi kali ini yang masuk dalam fokus kajian adalah emisi yang berasal dari cerobong sebagai sumber emisi utama akibat kegiatan produksi. Sedangkan emisi yang berasal dari kendaraan dan emisi fugitif tidak menjadi fokus kajian karena sifat emisinya yang sulit terkontrol namun akan tetap dikelola dengan baik yakni dengan memastikan debu pada area bahan baku (contoh: *Stockpile*) terkendali dengan baik; mendeteksi kebocoran pada saluran perpipaan dan cerobong; memastikan kegiatan proses beroperasi dan emisi terkendali; melaksanakan tata graha yang baik, dan mengalirkan Emisi dari proses kegiatan dengan memasang *hood* dan *duct* yang dilengkapi dengan alat pengendali Emisi.

Proses *Rotary Kiln Electric Furnace (RKEF)* diawali dengan pengeringan kandungan *moisture* hingga 45% melalui proses *pretreatment*. Pada proses tersebut, bijih laterit dikeringkan dengan *rotary dryer* pada temperatur 250°C hingga kandungan *moisture*-nya mencapai 15-20%. Produk dari *rotary dryer* selanjutnya masuk ke tahap kalsinasi (*prereduksi*) menggunakan *rotary kiln* pada suhu 800-900°C. adapun reaksi yang berlangsung di *rotary kiln*, yaitu: evaporasi dari air,

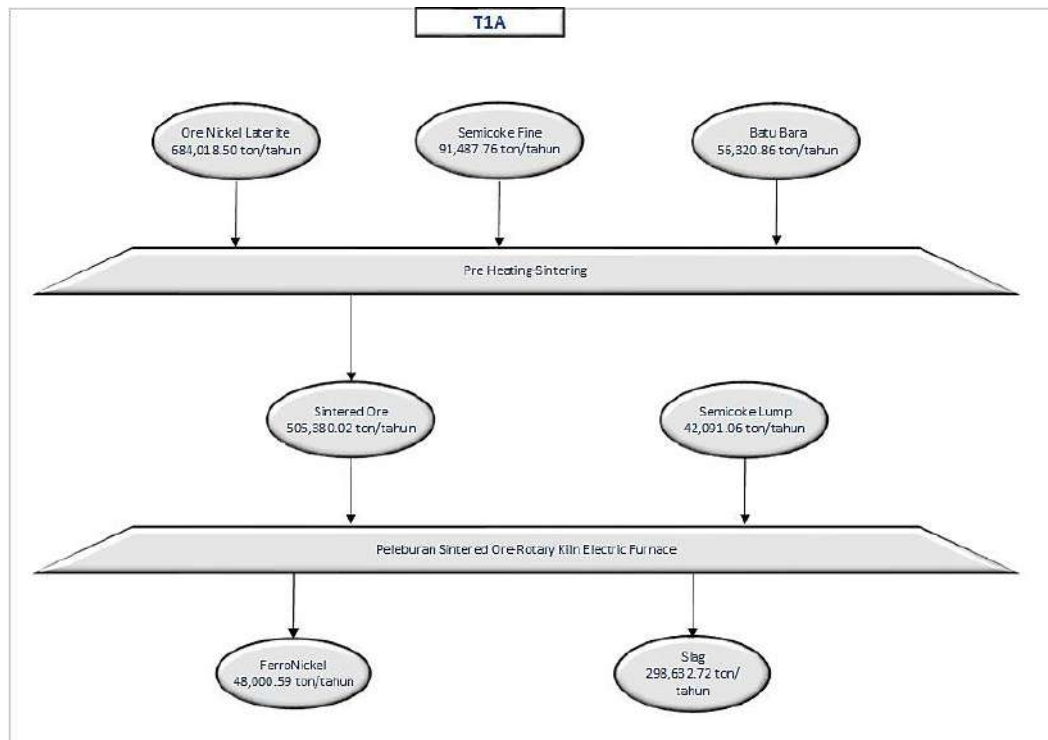
disosiasi dari mineral-mineral pada temperatur 700°C menjadi oksida-oksida dan uap air, reduksi dari nikel oksida dan besi oksida gas *reduktor* pada temperatur sekitar 800°C (Setiawan, 2016).

Hasil proses tersebut kemudian dilebur di dalam *electric furnace* pada temperatur 1500°C menghasilkan feronikel. Pada *electric furnace* terjadi pemisahan feronikel dari terak silika-magnesia, terjadi Reduksi nikel oksida dan besi oksida kalsin menjadi nikel logam, dan pelelehan dan pelarutan nikel dalam feronikel. Proses ini yang paling umum digunakan dalam industri pirometalurgi nikel saat ini karena tahapan proses dianggap lebih sederhana dan dapat diaplikasikan terhadap bijih dari berbagai lokasi.

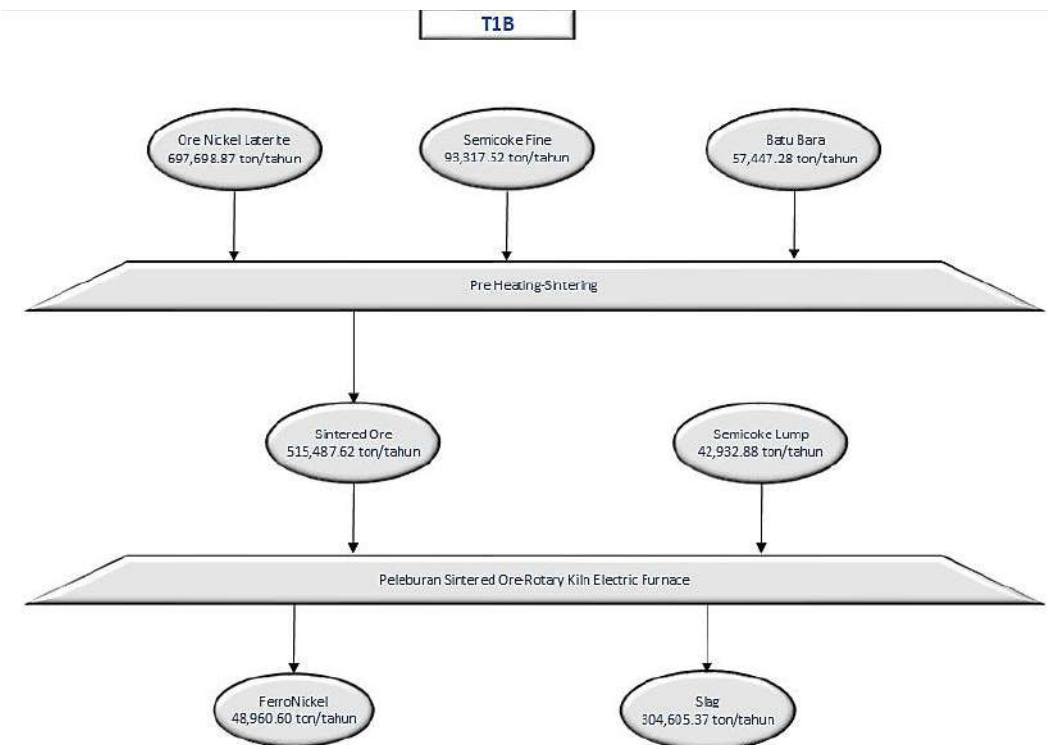
Neraca massa dari proses peleburan tersebut sebagaimana ditunjukkan oleh diagram pada Gambar 3.



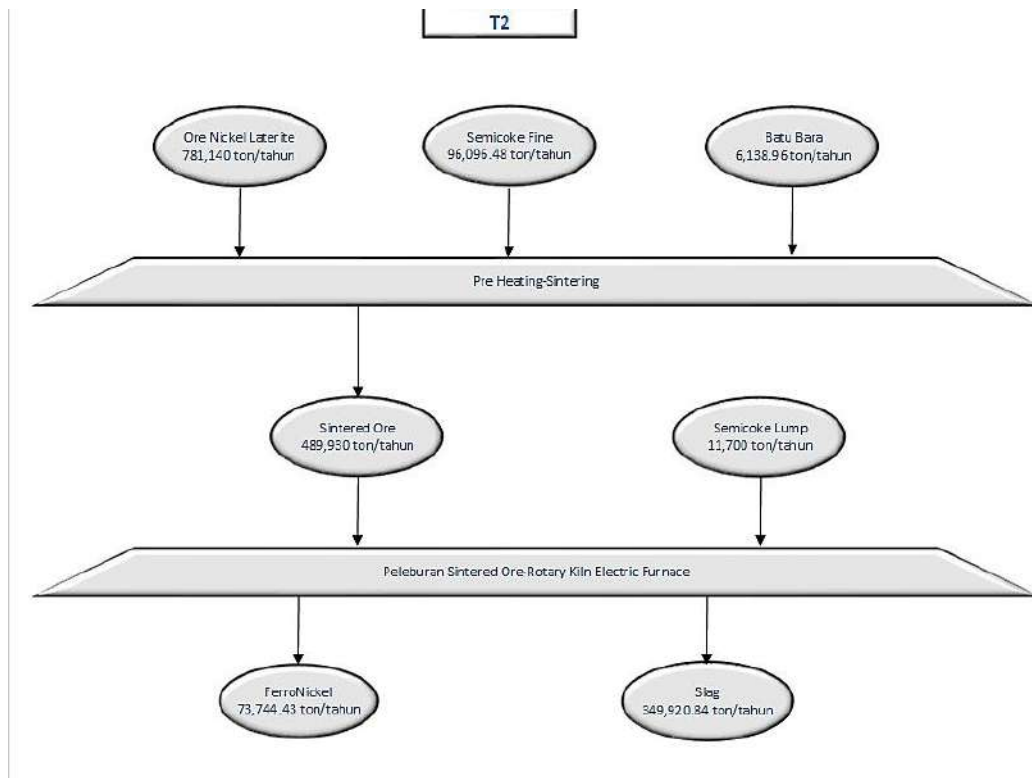
GAMBAR 3. Neraca Massa Kegiatan Pabrik Pengolahan Dan Pemurnian Nikel PT. Huadi Nickel-Alloy Indonesia Tahap 0



GAMBAR 4. Neraca Massa Kegiatan Pabrik Pengolahan Dan Pemurnian Nikel PT. Huadi Nickel-Alloy Indonesia Tahap 1A



GAMBAR 5. Neraca Massa Kegiatan Pabrik Pengolahan Dan Pemurnian Nikel PT. Huadi Nickel-Alloy Indonesia Tahap 1B



GAMBAR 6. Neraca Massa Kegiatan Pabrik Pengolahan Dan Pemurnian Nikel PT. Huadi Nickel-Alloy Indonesia Tahap 2

2.5. Sulfur Dioksida (SO₂) dan Dampaknya

SO₂ merupakan suatu gas yang tidak berwarna akan tetapi baunya sangat menyengat dan menyesakkan pernapasan. Umumnya gas SO₂ yang bereaksi dengan air akan berubah menjadi H₂SO₃ (Asam sulfat) kemudian perlahan-lahan berubah menjadi asam sulfat (H₂SO₄) yang sifatnya lebih berbahaya dari pada senyawa SO₂ dan senyawa asam sulfat serta senyawa SO₂ pada saat diudara bersih akan teroksidasi dengan sangat lambat membentuk SO₃ (sulfur dioksida) (Nuning, 2008).

Sulfur dioksida (SO₂) merupakan salah satu gas yang dihasilkan dari proses pembakaran fosil pada suatu industri yang sifatnya *precurso* (senyawa yang berpartisipasi dalam reaksi kimia yang menghasilkan senyawa lain) terhadap asam sulfat (H₂SO₄) serta komponen partikel aerosolnya dapat mengubah kandungan deposisi asam dan iklim global (Liandy, 2018). Gas SO₂ yang terlepas

ke atmosfer dapat bereaksi dengan cepat terhadap senyawa OH yang kemudian membentuk senyawa HSO_3 dan juga dapat bereaksi dengan O_2 sehingga menghasilkan gas SO_3 serta dapat larut dalam awan dan aerosol saat bereaksi dengan H_2O . Hasil konversi dari proses-proses tersebut akan menghasilkan senyawa H_2SO_4 yang dapat memicu terjadinya hujan asam. Reaksi yang terjadi sebagai berikut (Cahyono, 2011) :



Dari persamaan tersebut maka reaksi antara gas SO_2 dengan uap air yang terdapat di udara akan membentuk asam sulfat dan apabila jatuh ke permukaan bumi secara bersamaan dengan jatuhnya air hujan maka akan menyebabkan terjadinya hujan asam yang dampaknya sangat berbahaya terhadap lingkungan sekitar serta kesehatan manusia (Nuning, 2008).

Gas SO_2 juga termasuk salah satu senyawa yang berbahaya terhadap manusia, hewan, kerusakan terhadap tanaman jika kadar SO_2 sebesar 0,5 ppm. Beberapa penelitian menyebutkan bahwa kadar SO_2 sebesar 5 ppm dapat menyebabkan iritasi pada tenggorokan atau bahkan terhadap individu yang sensitif terhadap iritasi pada kadar 1-2 ppm SO_2 (Zakaria, 2013).

TABEL 4. Efek SO_2 terhadap kesehatan manusia

Konsentrasi SO_2	Efek / dampak terhadap kesehatan
3 – 5 ppm	Sudah berbau
8 – 12 ppm	Menimbulkan iritasi saluran pernapasan
20 ppm	Menimbulkan iritasi pada mata
20 ppm	Menyebabkan batuk
20 ppm	Maksimum konsentrasi untuk pemaparan yang lama
50-100 ppm	Maksimum konsentrasi untuk pemaparan selama 30 menit

Gas SO_2 merupakan gas tidak berwarna akan tetapi jika konsentrasinya sebesar 0,3 ppm yakni dapat menghasilkan rasa sedangkan konsentrasi SO_2 sebesar 0,5 ppm dapat menghasilkan bau yang sangat menyengat dan

konsentrasi gas SO₂ sebesar 6-12 ppm dapat menyebabkan iritasi kuat bagi kulit dan selaput lendir serta dapat menimbulkan dampak lain bagi kesehatan manusia (Cahyono, 2011).

2.6. Nitrogen Oksida (NO_x) dan Dampaknya

Terdapat beberapa senyawa partikulat nitrogen (N) yang ada di atmosfer yakni senyawa N₂, N₂O, NO, NO₂, nitrat radikal (NO₃), N₂O₅, HNO₂, asam nitrat (HNO₃), nitrat organik seperti *peroxyacyl* nitrat (CH₃COO₂NO₂) yaitu PAN dan sedikit senyawa N seperti NH₃ dan HCN serta dalam bentuk cairan berupa senyawa NO₂, NO₃ dan NH₄. Akan tetapi senyawa nitrogen yang paling banyak diperhatikan sebagai zat pencemar yakni senyawa dinitrogen oksida (N₂O), nitrogen monoksida (NO), nitrogen dioksida (NO₂) dan nitrogen oksida (NO_x).

Gas NO₂ berasal dari hasil pembakaran senyawa nitrogen yang terjadi melalui reaksi kimia pada lapisan troposfer. NO₂ memiliki warna yang bervariasi mulai dari warna kuning hingga cokelat tergantung konsentrasi di atmosfer akan tetapi memiliki bau yang sangat menyengat dan bersifat iritatif dan relatif bersifat toksik dan korosif. NO₂ dihasilkan dari beberapa proses reaksi kimia yang terjadi di atmosfer melalui reaksi oksida langsung seperti pada persamaan berikut :



Beberapa reaksi foto kimia juga melibatkan O₃, RO₂ dan lebih banyak jenis hidrogen (OH, HO₂, H₂O), memiliki reaksi kimia adalah sebagai berikut :



Senyawa-senyawa tersebut merupakan senyawa yang dihasilkan dari reaksi oksidasi fotokimia NO. Dimana tingginya konsentrasi NO₂ terjadi pada tengah hari baik di area perkotaan maupun pinggir kota (Hastutiningrum, 2018). Gas nitrogen dioksida (NO₂) yang dihasilkan ke udara merupakan hasil pembakaran bahan bakar dimana gas NO₂ dapat mempengaruhi dan mencemari udara. Gas NO₂ yang berada pada udara ambien di sekitar pabrik industri dalam

waktu yang cukup lama dapat menyebabkan dampak yang buruk terhadap lingkungan yang terkena paparan konsentrasi polutan tersebut (Liandy, 2015).

Sedangkan menurut Assomadi (2016) gas NO_2 merupakan gas pencemar non-konservatif (reaktif) dimana gas NO_2 sangat sensitif terhadap perubahan intensitas radiasi matahari karena dapat bereaksi membentuk ozon (O_3). Dalam proses distribusi gas NO_2 dipengaruhi oleh proses difusi, adveksi dan reaksi yang dijalankannya di atmosfer. Adapun sifat fisik gas NO_2 yakni berwarna merah kecokelatan dan berbau tajam menyengat hidung (Widyani, 2018).

Gas NO_2 dalam bentuk polutan sangat berbahaya terhadap kerusakan lingkungan sekitar karena dapat menyebabkan hujan asam yang akan berdampak pada kerusakan bangunan, keasaman tanah serta gas ini mudah bereaksi dengan polutan udara lainnya serta berpotensi terhadap pembentukan lapisan ozon yang sangat berbahaya terhadap kerusakan lingkungan. Dampak gas NO_2 terhadap kesehatan manusia dengan konsentrasi tertentu yakni dapat menyebabkan infeksi paru-paru dan gangguan saluran pernapasan (Rofienda, 2004).

2.7. Pengambilan Sampel Kualitas Udara

Kriteria penentuan lokasi pengambilan sampel (contoh uji) kualitas udara ambien mengacu pada SNI 7119.6-2005. Teknik sampling udara ambien yaitu sampling kualitas udara pada media penerima polutan udara/emisi udara. Prinsip dalam menentukan lokasi sampling yang perlu diperhatikan adalah bahwa data yang diperoleh harus dapat mewakili daerah yang sedang dipantau, yang telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Titik pemantauan kualitas udara ambien ditetapkan dengan mempertimbangkan faktor meteorologi, faktor geografi, dan tata guna lahan. Kriteria berikut dapat dipakai dalam penentuan suatu lokasi pemantauan kualitas udara ambien:

1. Area dengan konsentrasi pencemar tinggi. Daerah yang didahulukan untuk dipantau hendaknya daerah-daerah dengan konsentrasi pencemar yang tinggi. Dibutuhkan satu atau lebih stasiun pemantau di daerah sekitar yang emisinya besar.
2. Area dengan kepadatan penduduk yang tinggi, terutama ketika terjadi pencemaran yang berat.

3. Di daerah sekitar lokasi penelitian yang diperuntukkan untuk kawasan studi maka stasiun pengambil contoh uji perlu ditempatkan di sekeliling daerah/kawasan.
4. Di daerah proyeksi. Untuk menentukan efek akibat perkembangan mendatang di lingkungannya, stasiun perlu juga ditempatkan di daerah-daerah yang diproyeksikannya.
5. Mewakili seluruh wilayah studi. Informasi kualitas udara di seluruh wilayah studi harus diperoleh agar kualitas udara di seluruh wilayah dapat dipantau (dievaluasi).

Adapun beberapa persyaratan yang dapat digunakan dalam pemilihan titik pengambilan contoh uji adalah sebagai berikut:

1. Hindari tempat yang dapat mengubah konsentrasi akibat adanya absorpsi, atau adsorpsi (seperti dekat dengan gedung-gedung atau pohon-pohonan).
2. Hindari tempat dimana pengganggu kimia terhadap bahan pencemar yang akan diukur dapat terjadi: emisi dari kendaraan bermotor yang dapat mengotori pada saat mengukur ozon, amoniak dari pabrik refrigerant yang dapat mengotori pada saat mengukur gas-gas asam.
3. Hindari tempat dimana pengganggu fisika dapat menghasilkan suatu hasil yang mengganggu pada saat mengukur debu (particulate matter) tidak boleh dekat dengan incinerator baik domestik maupun komersial, gangguan listrik terhadap peralatan pengambil contoh uji dari jaringan listrik tegangan tinggi.
4. Letakkan peralatan di daerah dengan gedung/bangunan yang rendah dan saling berjauhan.
5. Apabila pemantauan bersifat kontinyu, maka pemilihan lokasi harus mempertimbangkan perubahan kondisi peruntukan pada masa datang.

Pada arah angin dominan, lokasi pemantauan kualitas udara ambien minimum dua lokasi dengan mengutamakan daerah permukiman atau tempat-tempat spesifik. Sedangkan pada arah angin lainnya minimum satu titik. Data arah angin dapat merupakan data sekunder dari stasiun meteorologis terdekat atau data pengukuran langsung di lapangan. Sedangkan jarak lokasi pemantauan dari industri ditentukan berdasarkan hasil model simulasi, pengamatan lapangan, pengukuran sesaat dan membuat isoplethnya.

2.8. Metode Pengambilan Contoh Uji Emisi

Metode pengambilan sampel emisi menggunakan isokinetik adalah salah satu metode yang umum digunakan untuk mengukur konsentrasi zat polutan dalam gas buang dari suatu sumber emisi. Metode ini melibatkan pengambilan sampel gas yang mengalir dengan kecepatan konstan (isokinetik) dari saluran buang suatu sumber emisi menggunakan alat yang disebut isokinetic sampling train.

Pengambilan sampel isokinetik dilakukan dengan mengatur kecepatan aliran sampel yang diambil agar sesuai dengan kecepatan aliran gas buang pada saluran emisi. Dengan cara ini, dapat dijamin bahwa sampel yang diambil mewakili komposisi gas buang pada kondisi operasi normal sumber emisi, sehingga hasil analisis dapat diandalkan.

Metode pengambilan sampel emisi menggunakan isokinetik biasanya dilakukan dengan menggunakan alat yang terdiri dari beberapa komponen, seperti inlet probe, filter, cyclone, dan kondensor. Inlet probe berfungsi untuk mengambil sampel gas dari saluran emisi, sementara filter dan cyclone digunakan untuk memisahkan partikel dari gas. Kondensor digunakan untuk menghilangkan kelembaban dari gas sehingga dapat diukur dengan akurat.

Setelah pengambilan sampel selesai, sampel gas diukur untuk konsentrasi polutan menggunakan alat analisis yang sesuai, seperti spektrometer massa atau analisis kimia lainnya. Data yang diperoleh dapat digunakan untuk mengevaluasi tingkat emisi polutan dari sumber emisi dan mengembangkan strategi pengendalian emisi yang efektif. Metode pengambilan sampel emisi menggunakan isokinetik sangat penting dalam mengukur kualitas udara dan memastikan bahwa sumber emisi tidak mencemari lingkungan dengan konsentrasi polutan yang berbahaya.

2.9. Dispersi Polutan Gaussian

Model dispersi atau sebaran polutan menggambarkan perubahan konsentrasi polutan dari waktu ke waktu berdasarkan data meteorologi tertentu seperti arah dan kecepatan angin, suhu dan kelembaban atmosfer dalam menyimulasikan proses pembentukan, pengangkutan dan pemecahan polutan (US EPA, 2021). Menurut Aslim (2013) dispersi atau sebaran polutan bertujuan untuk memprakirakan konsentrasi polutan yang dihasilkan dari sumber emisi bergerak atau tidak bergerak

dengan jarak tertentu sedangkan dalam menentukan jarak dispersi sebaran emisi dari suatu cerobong industri berdasarkan stabilitas atmosfer.

Dispersi merupakan suatu proses perpindahan, difusi, reaksi kimia dan pengangkutan polutan yang diemisikan ke udara oleh atmosfer. Emisi pencemaran udara akan tersebar sesuai kondisi meteorologi setempat terutama arah angin rata-rata, fluktuasi kecepatan turbulensi dan stabilitas atmosfer baik kontemporal maupun spasial. Arah dan kecepatan angin dari data meteorologi merupakan faktor utama dalam dispersi zat pencemaran udara yang dapat menentukan jangkauan arah terhadap daerah penerima polutan sedangkan stabilitas atmosfer dapat mempengaruhi bentuk kepulan emisi yang keluar dari cerobong asap (Assegaf, 2018).

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dari tahun ke tahun dapat memudahkan manusia melakukan suatu kegiatan, salah satu diantaranya yakni dapat mensimulasikan pola sebaran polutan serta dapat perhitungan nilai konsentrasi suatu polutan melalui beberapa metode, salah satunya yakni metode *Gaussian*. Model dispersi *Gaussian* merupakan suatu persamaan matematik berdasarkan suatu variabel yang sifatnya fisis serta dapat memberikan informasi yang detail dari sumber polutan dengan mengetahui konsentrasi dan pola sebaran emisinya terlebih dahulu dalam memantau dan mengevaluasi sebaran buangan polutan yang berbahaya dari sumber emisi tersebut (Hasibuan, 2015)

Nauli (2002) menjelaskan bahwa model dispersi *gauss* dapat menggambarkan keadaan partikel udara terhadap jarak dan waktu secara sederhana. Debit emisi yang dihasilkan secara konstan dari suatu cerobong asap (Q) akan terbawa angin dengan suatu kecepatan (u) dalam arah horizontal (x) dengan kecepatan massa (Q/u). Untuk polutan yang tidak bereaksi, maka massa polutan yang terkandung dalam setiap jarak yakni harganya akan sama. Akan tetapi kadarnya akan berkurang sesuai dengan bertambahnya jarak dan waktu, hal tersebut disebabkan adanya turbulensi atmosfer yang cenderung menyebarkan material ke arah horizontal dan vertikal. Rata-rata kadar suatu polutan dari suatu titik akan berbanding terbalik dengan lebar sebaran dan kecepatan angin. Dengan demikian pemodelan *gaussian* dapat dilihat dari persamaan berikut ini :

$$C = \frac{Q}{2\pi\mu_s\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{1y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left\{ \exp\left(-\frac{1(z-He)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{1(z+He)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \quad (8)$$

Keterangan :

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

Q = Laju emisi polutan dalam massa per waktu (mg/s) U_s = Kecepatan angin di titik sumber (m/s)

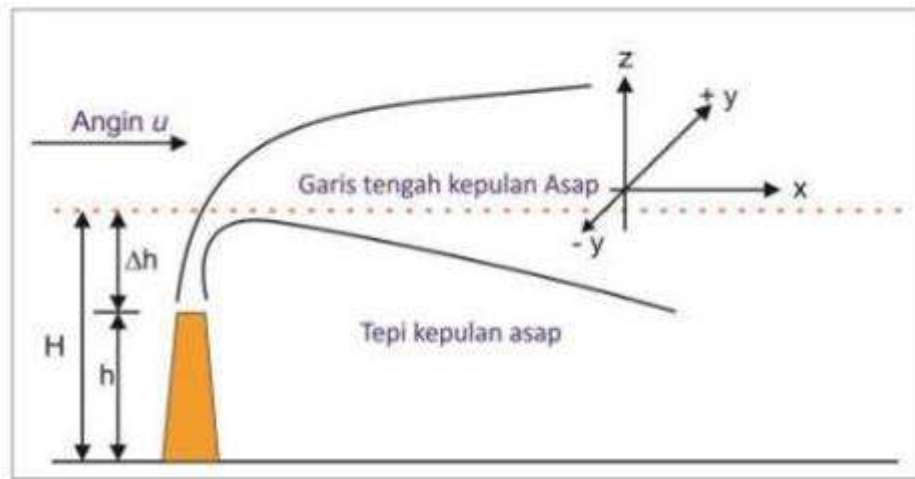
σ_x = Koefisien dispersi secara horizontal (m)

σ_y = Koefisien dispersi secara vertikal (m)

π = Konstanta matematika (3,14)

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

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



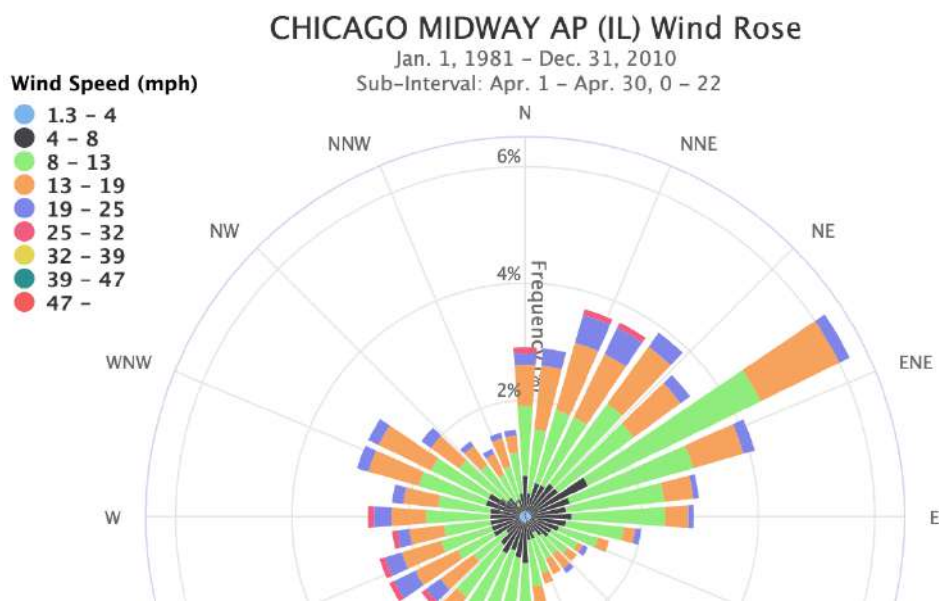
GAMBAR 7. Model sebaran polutan dari sumber titik berdasarkan sebaran gauss

Gambar 7 menunjukkan model dispersi polutan menggunakan model *gaussian plume*. Gambar 7 menjelaskan bahwa polutan bergerak searah dengan arah angin pada sumbu-x sedangkan untuk sumbu-y adalah tegak lurus horizontal dengan sumbu-x dan sumbu-z adalah vertikal dengan permukaan tanah dan difusi polutan terjadi melalui tiga dimensi yakni molekul polutan yang berdifusi pada sumbu-x, sumbu-y dan sumbu-z. Selain proses difusi juga terjadi proses adveksi atau transportasi polutan yang diakibatkan oleh angin dari sumbu-x (Rahmadani, 2017).

2.10. WRPLOT

WRPLOT View merupakan salah satu perangkat lunak yang dikembangkan oleh *lakes environment* yang dapat menghitung distribusi data angin yang jumlahnya cukup banyak dengan cepat serta dapat di overlay melalui *google earth* dimana hasil analisis arah dan kecepatan angin berdasarkan WR PLOT View menghasilkan data perhitungan frekuensi, persentase serta data yang lebih informatif dan interaktif melalui diagram *windrose* atau dikenal dengan diagram mawar angin (Fadholi, 2013)

Mawar angin atau *windrose* merupakan grafik yang menggambarkan kecepatan dan arah angin di suatu lokasi tertentu. Mawar angin digambarkan dalam format melingkar dimana panjang setiap jari-jari di sekitar lingkarannya menunjukkan jumlah waktu angin bertiup dari arah tertentu sedangkan warna di sepanjang jari-jari menunjukkan kategori kecepatan angin (NOAA, 2010). Panjang setiap baris pada mawar angin tersebut sebanding dengan pada saat terjadinya angin dari arah tertentu (Varma, 2013).



GAMBAR 8. Mawar angin (NOAA, 2010)

Mawar angin diaplikasi secara luas di berbagai bidang yakni penilaian dampak lingkungan, pengukuran emisi dari suatu industri, oseanografi, energi angin, teknik pertanian, pemantauan udara ambien, pengukuran kualitas udara,

pengujian kualitas udara dalam ruangan, pemodelan dispersi udara serta pemodelan dampak kebisingan.

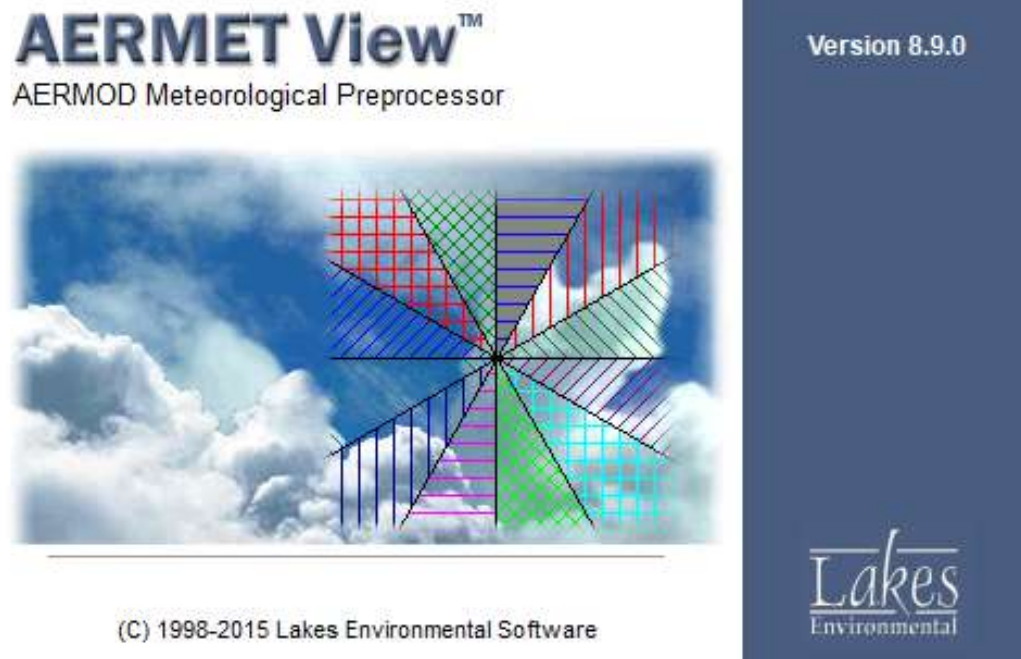
Mawar angin dapat disimulasikan berdasarkan data yang diperoleh dalam periode waktu tertentu seperti periode bulanan, musiman atau tahun tertentu. Dalam menafsirkan suatu mawar angin maka arah angin selalu mengacu pada arah dari mana angin tersebut bertiup (Varma, 2013).

2.11. SCREEN View

Screen view merupakan suatu *software* yang dapat menggambarkan perkiraan konsentrasi suatu polutan pada jarak 100 m. *Screen view* dikembangkan untuk memudahkan industri-industri yang menghasilkan suatu limbah yang terbang ke udara dalam memprakirakan dampak kualitas udara dari sumber tidak bergerak. Beberapa kegunaan dari *software Screen view* yaitu dapat memperkirakan konsentrasi maksimum permukaan tanah dan jarak maksimum, menggabungkan efek membangun *downwash* pada konsentrasi maksimum untuk kedua daerah bangun dekat dan daerah bangun jauh, memperkirakan konsentrasi di zona resirkulasi berongga, memperkirakan konsentrasi akibat inversi break-up dan fumigasi garis pantai, menentukan kenaikan *plume* (kepulan) untuk pelepasan *flare* (hasil pembakaran), memprakirakan efek dataran tinggi sederhana pada konsentrasi maksimum, memperkirakan konsentrasi rata-rata 24 jam akibat tumbukan *plume* (kepulan) di medan yang kompleks menggunakan Prosedur penyaringan 24 jam model *VALLEY*, memodelkan sumber daerah sederhana menggunakan pendekatan integrasi numerik, dapat digunakan untuk memodelkan efek dari sumber volume sederhana menggunakan prosedur sumber titik virtual, dapat menghitung konsentrasi maksimum pada sejumlah jarak yang ditentukan pengguna dalam bentuk datar atau medan sederhana yang ditinggikan, termasuk jarak hingga 100 km untuk transportasi jarak jauh, dapat memeriksa berbagai kondisi meteorologi, termasuk semua kelas stabilitas dan angin kecepatan untuk menemukan dampak maksimum serta efek *buoyancy-induced* dispersi (BID).

2.12. AERMET

Program AERMET merupakan proses pra prosesor (prapengolahan) profil vertikal data meteorologi pada AERMOD dalam menghasilkan pola sebaran emisi (Kumar, 2021) dimana data yang diolah pada AERMET yakni data meteorologi yang akan menghasilkan hasil perhitungan (data baru) setelah proses AERMET dilakukan (Assegaf, 2018).



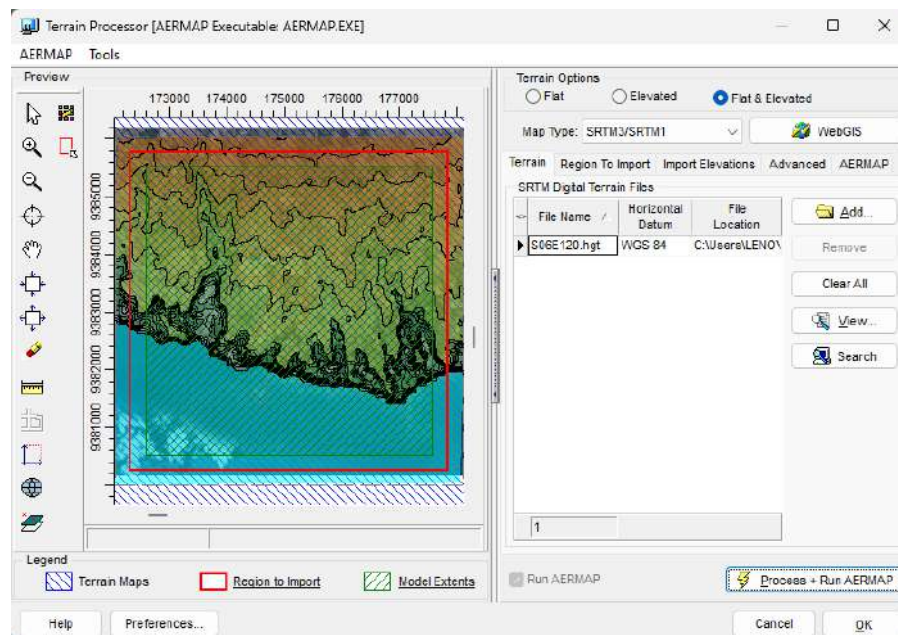
GAMBAR 9. Interface AERMET

Pertumbuhan dan struktur PBL (*Planetary Boundary Layer*) didorong oleh fluks panas dan momentum, yang pada gilirannya bergantung pada efek permukaan. Kedalaman lapisan ini dan penyebaran polutan di dalamnya dipengaruhi pada skala lokal oleh karakteristik permukaan seperti kekasaran permukaan, albedo, dan kelembaban permukaan yang tersedia. Seperti model seperti HPDM (Hanna dan Paine 1989; Hanna dan Chang 1993) dan CTDMPPLUS (Perry 1992), AERMOD menggunakan penskalaan permukaan dan lapisan campuran untuk mengarakterisasi struktur PBL. Preprocessor meteorologi AERMOD (AERMET) membutuhkan, sebagai input, karakteristik permukaan, tutupan awan, suara suhu udara pagi hari, dan satu pengukuran kecepatan angin, arah angin, dan suhu dekat permukaan. Dengan ini, model menghitung kecepatan gesekan, panjang Monin–Obukhov, skala kecepatan konvektif, skala suhu, tinggi

pencampuran, dan fluks panas permukaan. Dengan cara yang mirip dengan model seperti CTDMPLUS dan HPDM parameter penskalaan ini digunakan untuk membangun profil vertikal kecepatan angin, turbulensi lateral dan vertikal, gradien suhu potensial, dan suhu potensial. Evaluasi independen yang ekstensif terhadap parameter penskalaan dan profil vertikal ini belum dilakukan untuk situasi medan perkotaan dan kompleks selain yang dicapai di banyak referensi yang ditempatkan. Namun, evaluasi model keseluruhan telah menunjukkan bahwa parameterisasi ini mengarah pada perkiraan konsentrasi kepulan yang dapat dibandingkan dengan baik dengan berbagai pengamatan lapangan (Cimorelli, 2004).

2.13. AERMAP

AERMAP dalam format data *digital elevation model* (DEM) (USGS, 1994). Preprocessor terrain juga digunakan untuk menghitung reseptor terpisah dan kisi reseptor (Cimorelli, 2004). AERMAP sebagai program prapemrosesan medan sebelum di masukkan ke dalam model AERMOD.



GAMBAR 10. Interface AERMAP

AERMAP adalah sebuah program komputer yang digunakan dalam analisis pemodelan kualitas udara. Singkatan dari AERMAP adalah "*AERMIC Model Application Program*". Program ini dikembangkan oleh United States Environmental Protection Agency (EPA) dan digunakan untuk mengevaluasi

pengaruh emisi dari sumber-sumber pencemar udara pada kualitas udara di suatu lokasi tertentu.

AERMAP digunakan untuk memetakan topografi permukaan bumi dan penggunaan lahan, dan menghasilkan model distribusi emisi pencemar yang disebarkan oleh angin di atas permukaan tersebut. Program ini dapat menghasilkan data yang dapat digunakan oleh program AERMOD, yang merupakan model pemodelan pencemaran udara yang lebih detail, untuk melakukan analisis kualitas udara secara lebih rinci.

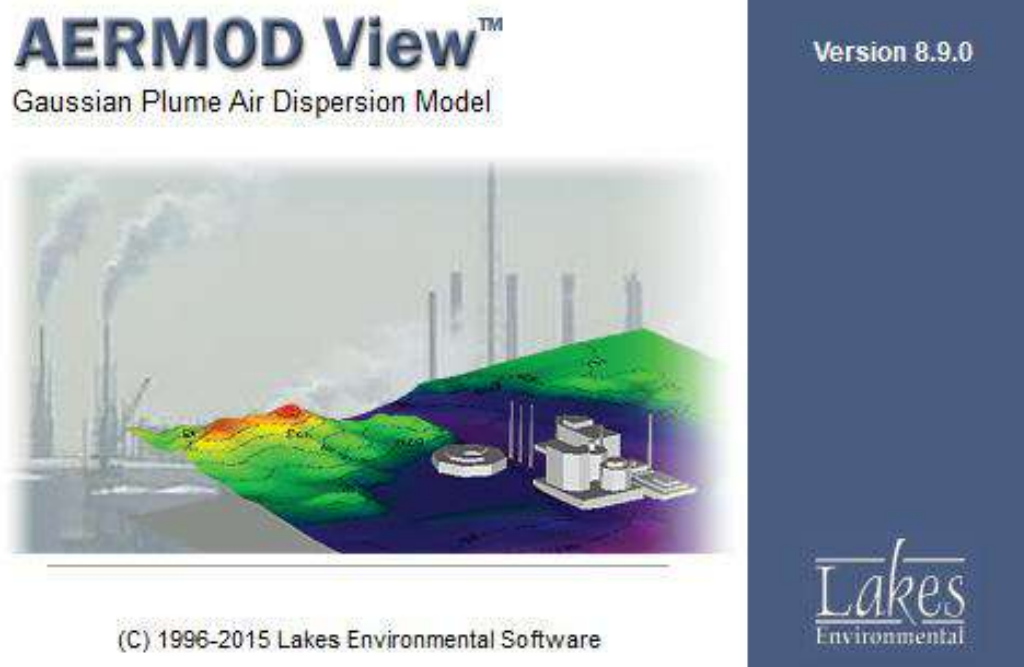
AERMAP berfungsi sebagai program komputer yang membantu menghasilkan data topografi permukaan bumi dan penggunaan lahan, serta model distribusi emisi pencemar yang disebarkan oleh angin di atas permukaan tersebut. Dengan kata lain, fungsi AERMAP adalah sebagai berikut:

1. Memetakan topografi permukaan bumi dan penggunaan lahan: AERMAP dapat mengambil data topografi dan penggunaan lahan dari sumber data seperti peta topografi dan citra satelit, dan mengubahnya menjadi data yang dapat digunakan oleh program-model pemodelan kualitas udara lainnya.
2. Menentukan karakteristik udara lokal: AERMAP dapat mengumpulkan data meteorologi lokal, seperti kecepatan dan arah angin, suhu, dan kelembaban, untuk memperkirakan bagaimana emisi pencemar akan menyebar di suatu lokasi tertentu.
3. Menentukan distribusi emisi pencemar: AERMAP menggabungkan data topografi dan penggunaan lahan dengan karakteristik meteorologi lokal untuk memperkirakan bagaimana emisi pencemar akan menyebar di suatu daerah tertentu.
4. Menghasilkan data untuk program-model pemodelan kualitas udara lainnya: Data yang dihasilkan oleh AERMAP dapat digunakan oleh program-model pemodelan kualitas udara lainnya, seperti AERMOD, untuk melakukan analisis kualitas udara secara lebih rinci.

2.14. AERMOD

AERMOD merupakan suatu model yang dapat menggambarkan pola sebaran polutan atau prakiraan dampak polutan udara yang dikembangkan oleh AERMIC (*American Meteorological Society {AMS} / United States Environmental*

Protection Agency {EPA} Regulatory ModelImprovement Committe). Model ini menggunakan pendekatan gaussian dan bi-gaussian yang dapat menghasilkan prakiraan konsentrasi polutan udara ambien baik periode harian, bulanan maupun tahunan (Natsir, 2017). Model AERMOD menerapkan teori *similarity planetary baoundary layer (PBL)* untuk memperhitungkan dispersi yang dipengaruhi oleh pemanasan dan gesekan akan tetapi jangkauan sebaran emisi model AERMOD memiliki jangkauan yang pendek (kurang dari 50 km) dalam menyimulasikan pola sebaran emisi yang keluar dari cerobong industri. (Assegaf, 2018).



GAMBAR 11. Interface AERMOD

Prakiraan pola sebaran polutan model AERMOD dapat diaplikasikan di beberapa area seperti area perkotaan dan pedesaan, permukaan bumi yang rata atau berelevasi, emisi yang dihasilkan dari permukaan atau ketinggian, dan emisi yang dikeluarkan dari beberapa sumber (sumber titik, area atau volume) (Kumar, 2021). Simulasi sebaran polutan model AERMOD didasarkan data meteorologi seperti data tutupan awan, suhu, kelembaban relatif, tekanan, arah angin, kecepatan angin, tinggi awan, curah hujan per jam serta radiasi horizontal global. Akan tetapi dalam menghitung suatu konsentrasi, *software* AERMOD juga mempertimbangkan beberapa parameter seperti efek vertikal angin, turbulensi dan suhu (Aly, 2018).

AERMOD merupakan model gaussian jangkauan pendek (kurang dari 50 km) untuk menyimulasikan penyebaran emisi cerobong dari aktivitas industri. Model ini telah dikalibrasi dan diadopsi oleh US.EPA sejak tahun 2005 untuk menggantikan model (*Industrial Source Complex*) ISC3. AERMOD menggunakan teori *similaritas Planetary Boundary Layer (PBL)* untuk memperhitungkan dispersi yang dipengaruhi oleh pemanasan permukaan dan gesekan. Model ini membutuhkan informasi permukaan berupa panjang kekasaran, kelembaban, dan reflektifitas. Selain itu, informasi atmosfer atas yang lengkap diperlukan untuk menentukan kedalaman lapisan pencampuran (*mixing height*), dan membangun penetrasi plume parsial sepanjang bagian atas lapisan pencampuran (Assegaf dan Jayadipraja, 2015).

Model AERMOD mempertimbangkan aspek refleksi dan dispersi vertikal dipandang sebagai proses bi-gaussian. Parameter meteorologi yang memberikan turbulensi yang digunakan juga lebih lengkap seperti: kecepatan kekerasan (*friction velocity*), skala kecepatan konvektif (*convective velocity scale*), tinggi lapisan batas (*mechanical and convective boundary layer height*) dan *mono-obukhov length*. Pada model AERMOD tersebut karakteristik atmosfer diperkirakan dengan baik, sehingga penentuan nilai koefisien yang terlibat dalam perhitungan dapat dilakukan dengan lebih baik (Assegaf, 2018). Pada AERMOD terdapat beberapa sumber polutan yang dapat dimodelkan yakni dengan berbagai karakteristik (APCD, 2020):

- Sumber titik (Point Sources): sumber polutan yang paling umum dengan karakteristik terisolasi lubang angin misalnya cerobong, contoh lainnya seperti emisi dari pabrik.
- Sumber Area (Area Sources): digunakan untuk memodelkan pelepasan polutan yang berasal dari suatu area seperti TPA, tangka terbuka, dan lain-lain.
- Sumber Openpit (Openpit Sources): Sumber openpit digunakan untuk memodelkan emisi dari lokasi tambang yang terbuka berdasarkan kondisi meteorologi.
- Sumber Volume (Volume Sources): Jenis sumber ini digunakan untuk model yang memiliki volume 3 dimensi contohnya seperti kendaraan di sepanjang jalan yang bervolume (*line volume sources*), emisi kebocoran, dan lain-lain.

- Sumber garis (line sources): Jenis sumber ini digunakan untuk memodelkan pelepasan emisi yang berasal dari berbagai sumber seperti konveyor horizontal, jalur kereta api, dan jalan raya.

AERMET menggunakan data meteorologi dan karakteristik permukaan untuk menghitung parameter lapisan batas (mis. Tinggi pencampuran, kecepatan gesekan, dll) yang dibutuhkan oleh AERMOD. Data ini, apakah diukur di luar lokasi atau di lokasi, harus mewakili meteorologi dalam domain pemodelan. AERMAP menggunakan data terrain kisi-kisi untuk area pemodelan untuk menghitung ketinggian pengaruh medan yang representatif yang terkait dengan setiap lokasi reseptor. Data kisi-kisi diberikan ke AERMAP dalam format data *Digital Elevation Model* (DEM) (USGS 1994). *Preprocessor terrain* juga dapat digunakan untuk menghitung ketinggian untuk reseptor terpisah dan kisi reseptor (Cimorelli, 2004). Parameter penskalaan ini digunakan untuk menganalisa kecepatan angin dan turbulensi, gradien suhu potensial dan suhu potensial. Analisa ini belum mencakup situasi medan perkotaan, tetapi elevasi secara keseluruhan telah menunjukkan bahwa parameter ini mengarah pada perkiraan konsentrasi yang sebanding dengan pengamatan di lapangan (Cimorelli, et al., 2005).

Nauli (2002) menjelaskan bahwa model dispersi Gaussian dapat menyatakan secara sederhana penyimpangan partikel di udara terhadap jarak dan waktu. Banyaknya polutan yang dikeluarkan secara tetap dari cerobong asap (Q) akan terbawa angin dengan kecepatan (u) dalam arah horizontal (x) dengan kecepatan massa Q/u. Untuk polutan yang tidak bereaksi, massa polutan yang terkandung dalam setiap jarak akan sama harganya. Akan tetapi kadarnya akan berkurang sesuai dengan bertambahnya jarak dan waktu, karena turbulensi atmosfer cenderung menyebarkan material ke arah horizontal dan vertikal. Kadar rata-rata polutan pada suatu titik akan berbanding terbalik terhadap lebar sebaran dan kecepatan angin. Model Gauss diekspresikan dalam Persamaan 9.

$$C = \frac{Q}{2\pi\mu_s\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) x \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(z-He)^2}{\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(z+He)^2}{\sigma_z^2}\right) \right\} \quad (9)$$

Keterangan:

- C = Konsentrasi polutan udara dalam massa per volume (mg/m³)
 Q = Laju emisi polutan dalam massa per waktu (mg/s)
 μ_s = Kecepatan angin di titik sumber (m/s)

- σ_y = Koefisien dispersi secara horizontal (m)
 σ_x = Koefisien dispersi secara vertikal (m)
 π = Konstanta matematika (3,14)
 H_e = Tinggi efektif stack (cerobong) di pusat kepulan (m)
 Y = Jarak pengamatan sejajar dengan sumbu-y dari sumber emisi (m)

AERMOD View dapat dijalankan sehingga membutuhkan data laju emisi. Laju emisi diekspresikan sebagai satuan massa polutan yang dilepaskan per satuan waktu dimana satuan laju emisi yang digunakan adalah dalam g/s. Namun dalam pengaplikasiannya, nilai debit terhitung secara otomatis berdasarkan luas cerobong. Untuk mendapatkan satuan tersebut dapat dihitung dengan Persamaan 10.

$$E = \frac{L \times v \times C}{1000} \quad (10)$$

Keterangan:

- E : Laju Emisi (g/s)
 L : Luas cerobong (m²)
 v : Kecepatan gas buang (m/s)
 C : Konsentrasi emisi polutan (mg/m³)

AERMOD (*American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model*) adalah model numerik yang digunakan untuk memprediksi pola sebaran emisi dalam udara. Dalam Penelitian ini alasan AERMOD digunakan dalam memprediksi pola sebaran emisi:

1. Keakuratan prediksi: AERMOD menggunakan persamaan matematis yang kompleks dan mempertimbangkan faktor-faktor seperti topografi, meteorologi, komposisi udara, dan karakteristik emisi untuk memprediksi pola sebaran emisi dengan tingkat akurasi yang tinggi. Model ini juga mampu memperhitungkan variasi yang terjadi dalam pola sebaran emisi seiring berjalannya waktu.
2. Kepatuhan peraturan: AERMOD dikembangkan oleh *Environmental Protection Agency* (EPA) Amerika Serikat dan digunakan secara luas untuk memenuhi persyaratan peraturan pengendalian emisi udara. Dalam banyak yurisdiksi, perusahaan dan lembaga harus mengikuti panduan dan standar yang ditetapkan oleh badan regulasi, dan penggunaan model seperti AERMOD dapat membantu memenuhi persyaratan ini.

3. Evaluasi dampak lingkungan: Dalam industri seperti pertambangan dan pengolahan bijih nikel, penting untuk mengevaluasi dampak potensial yang ditimbulkan oleh emisi terhadap lingkungan. Dengan menggunakan AERMOD, industri dapat memperkirakan pola sebaran emisi dan memahami bagaimana emisi tersebut dapat mempengaruhi kualitas udara di sekitar lokasi tersebut. Informasi ini penting dalam menentukan langkah-langkah pengendalian emisi yang diperlukan untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan.
4. Perencanaan darurat: AERMOD juga dapat digunakan dalam perencanaan darurat dan respons terhadap insiden atau kecelakaan yang melibatkan pelepasan emisi berbahaya ke atmosfer. Dalam situasi seperti itu, model ini dapat membantu pihak berwenang dalam memahami dan memprediksi sebaran emisi, sehingga tindakan evakuasi atau pengendalian dapat diambil dengan cepat dan efektif.

2.15. Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU)

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) berkomitmen untuk memberikan informasi mutu udara yang tepat dan akurat kepada masyarakat dalam rangka upaya pengendalian pencemaran udara. Hal ini dibuktikan dengan terus meningkatnya jumlah stasiun pemantauan otomatis kontinu yang dimiliki KLHK yaitu ditargetkan mencapai 38 stasiun pada tahun 2020. Agar informasi tentang mutu udara mudah dipahami oleh masyarakat, hasil pemantauan mutu udara dari stasiun pemantauan otomatis kontinu disampaikan dalam bentuk Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU).

ISPU merupakan angka tanpa satuan, digunakan untuk menggambarkan kondisi mutu udara ambien di lokasi tertentu dan didasarkan kepada dampak terhadap kesehatan manusia, nilai estetika dan makhluk hidup lainnya. Khusus untuk daerah rawan terdampak kebakaran hutan dan lahan, informasi ini dapat digunakan sebagai *early warning system* atau sistem peringatan dini bagi masyarakat sekitar. Tujuan disusunnya ISPU agar memberikan kemudahan dari keseragaman informasi mutu udara ambien kepada masyarakat di lokasi dan waktu tertentu serta sebagai bahan pertimbangan dalam melakukan upaya-upaya pengendalian pencemaran udara baik bagi pemerintah pusat maupun pemerintah daerah (PermenLHK14, 2020).

Sementara itu, ISPU dibagi menjadi lima kategori dengan rentang nilai masing-masing. Tiap kategori pun direpresentasikan dengan warna tertentu :

1. Baik

Kategori ini dilambangkan dengan status warna hijau dan memiliki rentang nilai 1-50. Ini artinya, kualitas udara sangat baik dan tidak memberi dampak negatif terhadap manusia, hewan, dan tumbuhan. Dengan demikian, aktivitas di luar ruangan sangat boleh dilakukan.

2. Sedang

Kategori ini dilambangkan dengan status warna biru dan memiliki rentang nilai 51-100. Ini artinya, kualitas udara masih dapat diterima oleh kesehatan manusia, hewan, dan tumbuhan. Aktivitas di luar ruangan masih dapat dilakukan, tetapi beberapa kelompok dengan kondisi atau sensitivitas tertentu sebaiknya tidak beraktivitas fisik yang terlalu lama dan berat.

3. Tidak Sehat

Kategori ini dilambangkan dengan status warna kuning dan memiliki rentang nilai 101-200. Ini artinya, kualitas udara mulai bersifat merugikan manusia, hewan, dan tumbuhan. Aktivitas di luar ruangan masih bisa dilakukan, tetapi perlu lebih berhati-hati dan tidak melakukan kegiatan yang berat (terutama bagi kelompok yang sensitif). Beberapa gejala seperti napas menjadi sesak dan batuk mungkin dapat terjadi dan perlu diperhatikan.

4. Sangat Tidak Sehat

Kategori ini dilambangkan dengan status warna merah dan memiliki rentang nilai 201-300. Ini artinya, risiko kesehatan sangat mungkin terganggu, baik pada manusia, hewan, maupun tanaman. Dalam kondisi ini, semua aktivitas di luar ruangan perlu dihindari khususnya bagi mereka yang sensitif.

5. Berbahaya

Kategori ini dilambangkan dengan status warna hitam dan memiliki rentang nilai lebih dari sama dengan 301. Ini artinya, kualitas udara dapat merugikan kesehatan yang serius dan memerlukan penanganan yang cepat dan tepat. Setiap orang pun perlu menghindari untuk berada di luar ruangan dan terpapar udara.

TABEL 5. Matriks Penelitian Terdahulu

No	Nama Penulis	Judul	Pokok Persoalan	Hasil	Persamaan	Perbedaan
1	Awkash Kumar Anil Kumar Dilkshit Rashmi S. Patil 2021	Use of Simulated and Observed Meteorology for Air Quality Modeling and Source Ranking for an Industrial Region	Tidak terpantaunya jumlah konsentrasi emisi kendaraan dan industri yang dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia.	Konsentrasi PM ₁₀ sebesar 3% dan NO _x sebesar 17% dari kendaraan sedangkan konsentrasi PM ₁₀ sebesar 94% dan NO _x sebesar 20-30% dari sumber industri.	Menggunakan model Americana Meteorological Society / Environmental Protection Agency Regulatory Model (AERMOD) Pemodelan dari sumber emisi industri Konsentrasi yang dimodelkan yaitu gas SO ₂	Pemodelan dari sumber emis gas kendaraan. Konsentrasi yang diukur NO _x dan PM ₁₀ Penelitian ini: Pemodelan dari sumber industri smelter nikel.
2	Xiaoman Wang Min Liu Li Luo Xi Chen Yongyun Zhang Haoran Zhang Shudi Yang Yuxiao Li 2021	Spatial and Temporal Distributions of Air Pollutans in Nanchang, Southeast China during 2017-2020	Tidak terpantauanya emisi d kota Cina yang disebabkan oleh kegiatan industri dan kendaraan	Kosentrasi emisi yang paling tinggi terjadi pada pagi hari	Parameter yang diukur yaitu gas SO ₂ dan NO _x	Menggunakan metode sampling Paramter yang diukur yaitu PM _{2.5} , PM ₁₀ , CO Pengukuran emisi perkotaan Penelitian ini: Pemodelan dari sumber industri smelter nikel

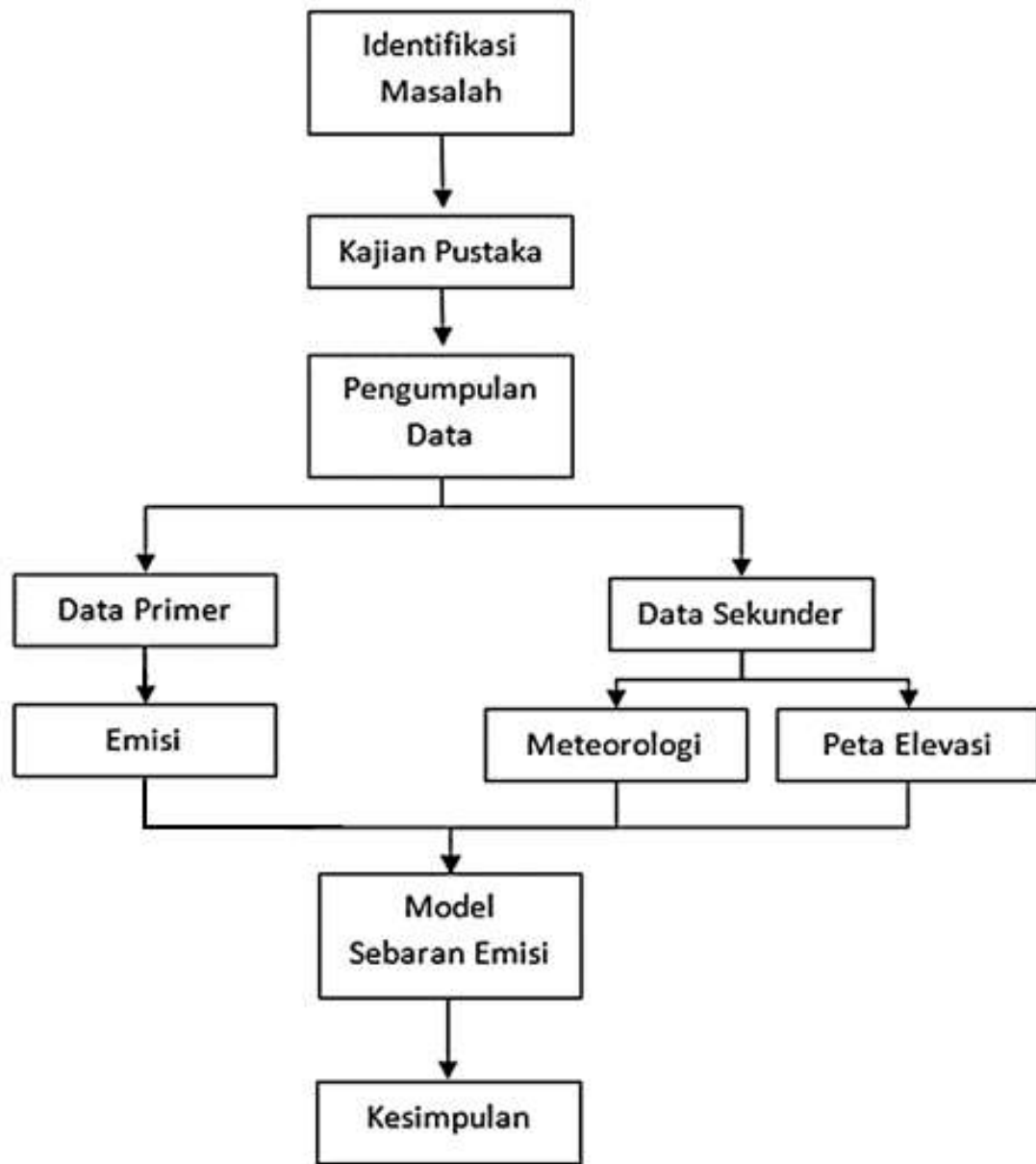
3	Xiaoman Wang Min Liu Li Luo Xi Chen Yongyun Zhang Haoran Zhang Shudi Yang Yuxiao Li 2021	Spatial and Temporal Distributions of Air Pollutants in Nanchang, Southeast China during 2017-2020	Tidak terpantauanya emisi di kota Cina yang disebabkan oleh kegiatan industri dan kendaraan	Kosentrasi emisi yang paling tinggi terjadi pada pagi hari	Parameter yang diukur yaitu gas SO ₂ dan NO _x	Menggunakan metode sampling Parameter yang diukur yaitu PM _{2.5} , PM ₁₀ , CO Pengukuran emisi perkotaan Penelitian ini: Pemodelan dari sumber industri smelter nikel
4	Liguang Li Ziqi Zhao Hongbo Wang Yangfeng Wang Ningwei Liu Xiaolan Li Yanjun Ma 2020	Concentration of Four Major Air Pollutants among Ecological Fungtional Zones in Shenyang, Northeast Cina	Tidak terpantaunya polutan di kota Shenyang, tiongkok Timur Laut akibat aktivitas industri, kendaraan dan aktivitas manusia yang dapat	Terpantaunya polutan di kota Shenyang, Tiongkok Timur Laut akibat aktivitas industri, kendaraan dan aktivitas manusia yang dapat menghasilkan emisi	Parameter yang diukur yaitu gas SO ₂ dan NO _x	Metode analisis datanya menggunakan processing method for the Landast dengan perangkat lunak erdas imagine dan ArcGIS Pemantauan emisi pada perkotaan Parameter yang diukur yaitu PM _{2.5} , PM ₁₀ Penelitian ini: Pemodelan dari sumber industri smelter nikel

5	Dewi Eviane Taufik Abdillah Natsir Nur Iswanto Zulfadly Urufi Mardjianto Adj, 2020	Air Pollution Dispersion Modeling of Runway and Apron at Sam Ratulangi International Airport	Tidak terkendalinya polusi yang dihasilkan dari kegiatan di bandara Sam Ratulangi yang dapat mempengaruhi kesehatan masyarakat.	Peningkatan konsentrasi maximum gas NO _x di tahun 2024 sebesar 250 µg/m ³ dan gas CO sebesar 87 di µg/m ³ bandara sam ratulangi degan asumsi peningkatan emisi setiap tahunnya sebesar 9.9%	Menggunakan model AERMOD	Pemodelan dari sumber emisi kegiatan bandara Konsentrasi yang dimodelkan yaitu NO _x , PM ₁₀ dan CO Penelitian ini: Pemodelan dari sumber industri smelter nikel Konsentrasi yang dimodelkan yaitu gas SO ₂
6	Bas Mijling 2019	High-resolution mapping of urban air quality with heterogeneous observations : a new methodology and its application to amterdam	Tidak terpantaunya kualitas udara akibat aktivitas perkotaan yang dapat menjadi penyebab kesehatan masyarakat dan kerusakan ekosistem.	Akurasi konsentrasi gas NO ₂ perjam sebesar 39% dalam jarak 2 km dari lokasi pengamatan dan 53% pada jarak yang lebih jauh	Menggunakan model AERMOD Parameter yang di ukur yaitu gas NO ₂	Pemodelan dari sumber emisi aktivitas perkotaan Penelitian ini : Pemodelan dari sumber industri smelter nikel Parameter yang di ukur yaitu gas SO ₂
7	S Syahrorini, A Rahmansyah S H Pramono 2018	Distribution Model of Particulate Dust From Chimney of Sidoarjo Sugar	Tidak terpantaunya emisi yang dihasilkan cerbong pabrik gula sidoarjo	Konsentrasi tertinggi partikulat sebesar 4 yang terjadi pada malam hari sekitar pukul 22.00 - 04.00.	-	Menggunakan metode gravimetri Pemodelan dari sumber emisi cerobong pabrik gula sidoarjo Parameter yang di ukur yaitu TSP Penelitian ini : Pemodelan dari sumber industri smelter nikel

8	Erwin Azizi Jayadipraja Anwar Daud Alimuddin Hamzah Assegaf Maming 2016	The Use of Aermod in Modelling The Emission Dispersion of SO ₂ dan NO ₂ to Identify Area Exposed to Health Risk	Tidak terpantaunya emisi cerobong di PT Semen Tonasa Sulawesi selatan	Nilai puncak konsentrasi polutan SO ₂ dan NO ₂ selama satu jam berturut- turut adalah 135 g/m ³ dan 160 g/m ³ . Sebaran polutannya cenderung beradadi wilayah timur	Menggunakan model AERMOD Parameter yang di ukur yaitu gas SO ₂ dan NO ₂	Pemodelan dari sumber emisi cerobong PT Semen Tonasa Penelitian ini : Pemodelan dari sumber industri smelter nikel
9	Mahmoud Bady 2016	Evaluation of Gaussian Plume Model againts CFD Simulation through the Estimation of CO and NO Concentrations in an Urban Area	Mngevaluasi metode pemantauan emisi menggunakan pendekatan gaussian plume dan metode CFD	Pemantauan emisi menggunakan model gaussian lebih efektif dibandingkan dengan metode CFD baik dari segi efisiensi waktu	Parameter yang di ukur yaitu gas NO _x Menggunakan metode Gaussian	Menggunakan metode Computational Fluid Dynamic CFD) Parameter yang diukur yaitu gas CO Penelitian ini : Menggunakan metode model AERMOD.
10	Dejene Alemayehu Francine Hackett 2015	Gaussian Dispersion Model to Estimate the Dispersion of Partikulat Matter (PM _{2.5}) and Sulfur Dioxide (SO ₂) Concentrations on Tribal Land, Okhlahoma	Tidak terpantaunya emisi dari pembangkit listrik, kilang dan pabrik karbon di Oklahoma	Terpantaunya emisi dari pembangkit listrik, kilang dan pabrik karbon di Oklahoma	Menggunakan dispersi gaussian model AERMOD Parameter yang di ukur yaitu gas SO ₂	Pemodelan dari sumber emisi pembangkit listrik, kilang dan pabrik karbon di Oklahoma Parameter yang di ukur yaitu gas PM _{2.5} Penelitian ini : Pemodelan dari sumber industri smelter nikel Parameter yang di ukur yaitu gas NO ₂

11	S Anand Kumar Varma U Sathish N Nagaraja 2016	Prediction of SPM, SO ₂ dan NO ₂ Concentrations in The Vicinity of Cement Industry Cement Industry Using Gaussian Model	Tidak terpantaunya emisi yang dihasilkan oleh Industri semen	Terpantaunya emisi yang dihasilkan oleh Industri semen	Menggunakan dispersi gaussian tanpa pemodelan Parameter yang di ukur yaitu gas SO ₂ dan NO ₂	Menghitung emisi yang dihasilkan dari industri semen Parameter yang di ukur yaitu SPM suspended particulate matter) Penelitian ini : Pemodelan dari sumber industri smelter nikel
12	Muhammad Arief Fitrah Istiyanto Aslim Nasrul Ihsan Ahmad Yani 2019	Pemodelan Sebaran Polutan Udara akibat Aktivitas PLTD Tello Kota Makassar Menggunakan Model Dispersi Gauss	Tidak terpantaunya polutan udara di PLTD Tello Makassar	Model sebaran polutan tersebar ke arah timur, tenggara, barat dan barat laut. Jarak dispersi polutannya lebih jauh pada malam hari	Menggunakan model AERMOD	Pemodelan dari sumber emisi cerobong PLTD Tello Makassar Parameter yang di ukur yaitu gas CO Penelitian ini : Pemodelan dari sumber industri smelter nikel Parameter yang di ukur yaitu gas SO ₂ dan NO ₂

13	Sumarni Hamid Aly Muralia Hustim Rasdiana Zakaria Ika Estu Rahmawati 2018	Aplikasi Model Aermod dalam Memprediksi Sebaran Emisi Cerobong Asap PLTD Tello, Makassar	Tidak terpantaunya emisi cerobong asap PLTD Tello Makassar	Konsentrasi SO ₂ yaitu 11.42 µg/m ³ , 6.72 µg/m ³ , 4.68 µg/m ³ Konsentrasi NO ₂ yaitu 2.049 µg/m ³ , 1.232 µg/m ³ , 0.858 µg/m ³ . sebaran polutan selama 6 jam, 12 jam dan 24 jam terjadi di arah barat	Menggunakan model AERMOD Parameter yang di ukur yaitu gas SO ₂ dan NO ₂	Pemodelan dari sumber emisi cerobong PLTD Tello Makassar Penelitian ini : Pemodelan dari sumber industri smelter nikel
----	---	---	--	---	--	--



GAMBAR 12. Kerangka Pikir Penelitian