

TUGAS AKHIR - RE 184804

**PEMODELAN DISPERSI EMISI DARI PT X DENGAN MODEL
GAUSS TERMODIFIKASI**

ZIDAN BADRUDDIN YUSUF

NRP 0321184000032

Dosen Pembimbing

Dr. Abdu Fadli Assomadi, SSi., MT

NIP 19751018 200501 1 003

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

TUGAS AKHIR - RE 184804

**PEMODELAN DISPERSI EMISI DARI PT X DENGAN MODEL
GAUSS TERMODIFIKASI**

ZIDAN BADRUDDIN YUSUF
NRP 0321184000032

Dosen Pembimbing
Dr. Abdu Fadli Assomadi, SSi., MT
NIP 19751018 200501 1 003

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

Halaman ini sengaja dikosongkan

FINAL PROJECT - RE 184804

**EMISSION DISPERSION MODELLING FROM PT X WITH
MODIFIED GAUSSIAN MODEL**

ZIDAN BADRUDDIN YUSUF
NRP 0321184000032

Advisor
Dr. Abdu Fadli Assomadi, SSi., MT
NIP 19751018 200501 1 003

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

PEMODELAN DISPERSI EMISI DARI PT X DENGAN MODEL GAUSS TERMODIFIKASI

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar sarjana teknik pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

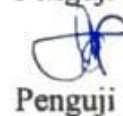
Oleh: **ZIDAN BADRUDDIN YUSUF**
NRP. 0321184000032

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Dr. Abdu Fadli Assomadi, SSi., MT
2. Prof. Ir. Joni Hermana, MScEs, PhD
3. Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST., MEPM
4. Adhi Yuniarto, ST., MT., PhD


Pembimbing


Penguji


Penguji


Penguji



Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa / NRP : Zidan Badruddin Yusuf / 03211840000032

Departemen : Teknik Lingkungan

Dosen Pembimbing / NIP : Dr. Abdu Fadli Assomadi SSi., MT / 19751018 200501 1 003

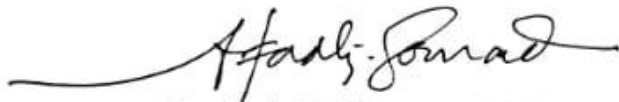
dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Pemodelan Dispersi Emisi dari PT X dengan Model Gauss Termodifikasi" adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Mengetahui,
Dosen Pembimbing

Surabaya, 22 Juli 2022

Mahasiswa



(Dr. Abdu Fadli Assomadi SSi., MT)
NIP. 19751018 200501 1 003



(Zidan Badruddin Yusuf)
NRP. 03211840000032

Halaman ini sengaja dikosongkan

PEMODELAN DISPERSI EMISI DARI PT X DENGAN MODEL GAUSS TERMODIFIKASI

Nama Mahasiswa / NRP : Zidan Badruddin Yusuf / 0321184000032
Departemen : Teknik Lingkungan FTSPK - ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Abdu Fadli Assomadi, SSi., MT

Abstrak

Indonesia merupakan negara yang memiliki ketersediaan sumber daya alam batu bara yang melimpah sebagai bahan bakar pembangkit listrik. Lebih dari 75% penggunaan tersebut dilakukan oleh Indonesia dalam menanggulangi krisis nasional. Selain itu, penggunaan batu bara dinilai memiliki efisiensi yang tinggi sehingga menghasilkan energi listrik yang ekonomis. Namun demikian, pembakaran batu bara sebagai bahan bakar berpotensi mencemari lingkungan sekitar serta memberikan efek negatif kepada makhluk hidup. PT X merupakan salah satu pembangkit listrik yang menggunakannya. Secara umum, PLTU memasang teknologi *Electrostatic Precipitator* (EP) dalam menangkap abu sisa pembakaran batu bara. Walaupun teknologi EP memiliki efisiensi penangkapan mencapai lebih dari 90%, pencemaran udara di sekitar kegiatan pembangkit tetap terjadi. Dari permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan pola sebaran emisi SO₂, NO_x, dan Hg serta konsentrasi maksimumnya di titik tertentu sebagai parameter emisi yang wajib dipenuhi dengan disesuaikan Permenlhk No.15 Tahun 2019.

Pola sebaran emisi PLTU diperhitungkan berdasarkan model dispersi Gauss. Model tersebut dipilih karena merupakan model yang paling mudah dan dianggap tepat untuk melukiskan secara matematis pola 3 dimensi dari perjalanan semburan (*plume*) emisi. Perhitungan pola sebaran dimodifikasi dengan beberapa macam faktor antara lain stabilitas atmosfer, arah dan kecepatan angin, *plume rise*, suhu udara dan tutupan awan, serta kondisi topografi. Pemodelan dilakukan dengan mengolah data primer berupa koordinat cerobong dan data sekunder terkait hasil pengujian emisi SO₂, NO_x, dan Hg sebagai baku mutu emisi PLTU selama satu tahun serta hasil uji ambien di sekitar PT X. Data tersebut dikelompokkan menjadi dua macam yang mempresentasikan musim hujan dan musim kemarau dengan merata-ratanya. Kemudian, data pengujian emisi dilakukan analisis dengan memadukannya dengan data sekunder lainnya yang mempengaruhi hasil model menggunakan bahasa pemrograman Python.

Hasil pemodelan menggunakan Python menghasilkan kontur dispersi dari masing-masing 3 emisi. Kontur dispersi tersebut diintegrasikan dengan *Google Earth* melalui aplikasi Surfer 22 yang menghasilkan informasi yang lebih mudah diinterpretasikan serta menarik. Hasil penelitian didapatkan pola sebaran dan akumulasi kontur dispersi dari setiap parameter dan musimnya. Pola sebaran emisi di kedua musim terpolakan ke arah barat daya berdasarkan data Stasiun Geofisika Pasuruan. Selain itu, hasil akumulasi kontur dispersi memiliki titik koordinat yang sama di setiap parameter dengan musim yang sama. Titik koordinat penerima emisi tertinggi pada musim hujan adalah (781936,455 m; 9143086,957 m), sedangkan pada musim kemarau adalah (782237,458 m; 9143387,96 m). Kemudian, keseluruhan hasil 2 model yang didapatkan dengan parameter yang berbeda tidak ada yang melebihi baku mutu ambien yang dipersyaratkan.

Kata kunci: *Dispersi, Emisi, Gauss, Model, Python*

Halaman ini sengaja dikosongkan

EMISSION DISPERSION MODELLING FROM PT X WITH MODIFIED GAUSSIAN MODEL

Student Name / NRP : Zidan Badruddin Yusuf / 0321184000032
Department : Environmental Engineering FTSPK- ITS
Advisor : Dr. Abdu Fadli Assomadi, SSi., MT

Abstract

Indonesia is a country that has abundant natural resources of coal as fuel for power generation. More than 75% of the use was made by Indonesia in tackling the national crisis. In addition, the use of coal is considered to have high efficiency so as to produce economical electrical energy. However, burning coal as a fuel has the potential to pollute the surrounding environment and have negative effects on living things. PT X is one of the power plant that use it. In general, power plant installs Electrostatic Precipitator (EP) technology in capturing ash from coal combustion. Even though EP technology has a capture efficiency of more than 90%, air pollution around power plant activities still occurs. From these problems, this study aims to obtain the distribution pattern of SO₂, NO_x, and Hg emissions and their maximum concentrations at certain points as emission parameters that must be met by adjusting Permenlhk No.15 Tahun 2019.

The distribution pattern of power plant emissions is calculated based on the Gaussian dispersion model. This model was chosen because it is the easiest model and is considered appropriate to describe mathematically the 3-dimensional pattern of the emission plume. The calculation of the distribution pattern was modified by several factors, including atmospheric stability, wind direction and speed, plume rise, air temperature and cloud cover, and topographic conditions. The modeling is carried out by processing primary data in the form of chimney coordinates and secondary data related to the results of testing emissions of SO₂, NO_x, and Hg as a quality standard for power plant emissions for one year and the results of ambient tests around PT X. The data are grouped into two types which represent the rainy season and the dry season on average. Then, the emission test data is analyzed by combining it with other secondary data that affects the model results using the Python programming language.

The modeling results using Python produce dispersion contours of each of the 3 emissions. The dispersion contours are integrated with Google Earth through the Surfer 22 application which produces information that is easier to interpret and interesting. The results of the study obtained the distribution pattern and the accumulation of dispersion contours of each parameter and season. The emission distribution pattern in both seasons is patterned to the southwest based on data from the Pasuruan Geophysics Station. In addition, the results of the accumulation of dispersion contours have the same coordinate points in each parameter with the same season. The coordinates of the highest emission receivers in the rainy season are (781936,455 m; 9143086,957 m), while in the dry season it is (782237,458 m; 9143387.96 m). Then, the overall results of the 2 models obtained with different parameters did not exceed the required ambient quality standards.

Keywords: *Dispersion, Emission, Gaussian, Model, Python*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbi ‘aalamin. Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, taufiq serta hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat berjalan dengan lancar. Shalawat serta salam untuk junjungan penulis, Nabi Muhammad SAW, yang telah memberikan cahaya bagi umat manusia dan rahmat bagi seluruh alam.

Tugas akhir ini berjudul “Pemodelan Dispersi Emisi dari PT X dengan Model Gauss Termodifikasi”. Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Abdu Fadli Assomadi, SSi., MT selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan arahan dan ilmu dari awal hingga akhir tugas akhir yang saya lalui.
2. Bapak Prof. Ir. Joni Hermana, MScEs, PhD, Bapak Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST., MEPM, dan Bapak Adhi Yuniarto, ST., MT., PhD selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Prof. Ir. Joni Hermana, MScEs, PhD juga selaku dosen wali yang selalu memberikan semangat serta bimbingan selama masa perkuliahan dari masa mahasiswa baru hingga di titik ini menuju W 126.
4. Bapak Mugiono dan Ibu Nur Hidayah selaku orang tua, Zuhairul Ghinannafsi dan Zahidin Fajrin Rosyid selaku adik kandung, serta seluruh keluarga bani Alm. Taswid dan Alm. Waryadi yang telah memberikan dukungan baik secara moril maupun materi.
5. Umar Sani, kawan seperbangunan putih abu-abu yang telah memberikan ilmu dan waktunya dalam mengajari penulis tentang bahasa pemrograman Python.
6. Mbak Niza Rizkiyani selaku staff lingkungan PT X yang telah menyambungkan penulis dengan perusahaan hingga menjadi karya dalam meraih gelar sarjana.
7. Keluarga besar Pondok Pesantren Darussalam Keputih Surabaya sebagai keluarga pertama tanah rantauan yang telah memberikan penguatan spiritual selama pengerjaan.
8. Teman-teman BEM ITS, HMTL ITS, UKM-Rebana ITS, PMII 1011, KMKB, dan RaMA Al-Alim yang telah menjadi wadah penulis dalam berkembang dan tidak sungkan untuk memberikan pertolongan dalam penyusunan laporan.
9. Teman-teman Teknik Lingkungan ITS angkatan 2018 -ENVISIBLE- dan adik-adik TL ITS yang telah memberikan semangat dan motivasi dalam penyusunan laporan.
10. Teman-teman SHE Officer MSIB Batch 2 Kampus Merdeka PT Barata Indonesia (Persero) sebagai saksi bisu penulis dalam memperjuangkan eksistensi kelompok dan skripsinya.
11. Serta seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu penulis hingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan semaksimal mungkin.

Terlepas dari semua itu, penulis sadar bahwa masih terdapat kekurangan pada berbagai aspek dan masih banyak yang harus diperbaiki. Oleh karena itu, penulis dengan terbuka menerima kritik dan saran dari pembaca agar dapat memperbaiki tugas akhir ini. Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat untuk banyak orang dan dapat dikembangkan kembali dengan hasil yang lebih baik.

Surabaya, 22 Juli 2022

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	1
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Ruang Lingkup	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II	3
TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1 Gambaran Umum Wilayah	3
2.2 Pencemaran Udara Industri PLTU.....	3
2.3 Sulfur Dioksida (SO ₂).....	3
2.4 Nitrogen Oksida (NO _x).....	4
2.5 Merkuri (Hg).....	5
2.6 Baku Mutu Emisi PLTU	6
2.7 Dispersi Emisi.....	6
2.7.1 Model Dispersi	7
2.7.2 Aplikasi Model untuk Menganalisis Konsentrasi Emisi	7
2.7.3 Bahasa Pemrograman Python.....	9
2.7.4 <i>Software</i> Pembuatan Kontur Dispersi.....	9
2.8 Faktor yang Mempengaruhi Dispersi Emisi	10
2.8.1 Stabilitas Atmosfer	10
2.8.2 Arah dan Kecepatan Angin	14
2.8.3 <i>Plume Rise</i>	16
2.8.4 Suhu Udara dan Tutupan Awan	17
2.8.5 Kondisi Topografi	17

BAB III	19
METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Gambaran Umum Penelitian	19
3.2 Kerangka Penelitian	19
3.3 Ide Penelitian.....	21
3.4 Tahap Persiapan	21
3.4.1 Studi Literatur	21
3.4.2 Perizinan Penelitian.....	21
3.5 Tahap Pelaksanaan	22
3.5.1 Pengumpulan Data	22
3.5.2 Analisis dan Pembahasan.....	22
3.6 Kesimpulan dan Saran.....	25
BAB IV	27
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Karakteristik Sumber Emisi	27
4.2 Hasil Pengujian Beban Emisi.....	27
4.3 Analisis Data Meteorologi.....	29
4.3.1 Penentuan Musim.....	29
4.3.2 Arah dan Kecepatan Angin	30
4.4 Analisis Data Hasil Uji Ambien PT X	31
4.5 Penentuan Faktor Penyebaran Emisi	38
4.5.1 Penentuan Karakteristik Emisi Model	38
4.5.2 Penentuan Data Meteorologi Model	39
4.5.3 Penentuan Stabilitas Atmosfer	40
4.6 Perhitungan Model	40
4.6.1 Konversi Satuan Beban Emisi.....	40
4.6.2 Penentuan Jarak Titik Penerima dari Sumber Emisi.....	41
4.6.3 Perhitungan Parameter Dispersi.....	43
4.6.4 Perhitungan <i>Buoyancy Flux</i>	43
4.6.5 Perhitungan Kecepatan Angin di Ujung Cerobong.....	44
4.6.6 Perhitungan <i>Plume Rise</i>	44
4.6.7 Perhitungan Nilai Konsentrasi di Titik Penerima	45
4.7 Pembuatan Model Dispersi	46
4.8 Analisis Prediksi Sebaran Emisi Pada Wilayah PT X.....	47

4.8.1	Analisis Sebaran Sulfur Dioksida.....	47
4.8.2	Analisis Sebaran Nitrogen Dioksida.....	50
4.8.3	Analisis Sebaran Merkuri	52
4.9	Pembuatan Kontur Dispersi Emisi.....	56
4.9.1	Kontur Dispersi Sulfur Dioksida.....	56
4.9.2	Kontur Dispersi Nitrogen Dioksida.....	61
4.9.3	Kontur Dispersi Merkuri	65
4.10	Validasi Model	70
4.11	Verifikasi Model	80
4.12	Perubahan Kondisi Atmosfer (Studi Kasus)	89
BAB V		97
KESIMPULAN DAN SARAN		97
5.1	Kesimpulan	97
5.2	Saran	97
DAFTAR PUSTAKA.....		99
LAMPIRAN 1		103
SCRIPT BAHASA PEMROGRAMAN PYTHON		103
LAMPIRAN 2		111
MEMBUAT KONTUR DISPERSI.....		111
LAMPIRAN 3		117
FORM ASISTENSI TUGAS AKHIR.....		117
BIODATA PENULIS.....		118

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel dampak Deposisi Asam	4
Tabel 2.2 Kondisi Atmosfer dalam Berbagai Kelas Stabilitas	10
Tabel 2.3 Persamaan Parameter Dispersi untuk Daerah Rural (Parameter Pasquill-Gifford)..	11
Tabel 2.4 Persamaan Parameter Dispersi untuk Daerah Urban (Parameter Pasquill-Gifford)	11
Tabel 2.5 Parameter yang Digunakan dalam Perhitungan σ_y	12
Tabel 2.6 Parameter yang Digunakan dalam Perhitungan σ_z Pasquill-Gifford	12
Tabel 2.7 Nilai p untuk Persamaan Perkiraan Kecepatan Angin	15
Tabel 4.1 Karakteristik Fisik Cerobong PT X	27
Tabel 4.2 Hasil Uji Emisi Cerobong PT X	28
Tabel 4.3 Data Uji Stasiun Pemantau Area Guest House	33
Tabel 4.4 Data Uji Stasiun Pemantau Desa Selobanteng	34
Tabel 4.5 Data Uji Stasiun Pemantau Area Pompa Banyuglugur	34
Tabel 4.6 Data Uji Stasiun Pemantau Eks Metrologi	34
Tabel 4.7 Data Uji Stasiun Pemantau Area Stock Pile/ Down Wind Coal Pile	35
Tabel 4.8 Data Uji Stasiun Pemantau Power Plant	35
Tabel 4.9 Data Uji Stasiun Pemantau Area Ash Disposal	36
Tabel 4.10 Data Uji Stasiun Pemantau PLTMB	36
Tabel 4.11 Data Uji Stasiun Pemantau Up Wind Coal Pile	36
Tabel 4.12 Data Uji Stasiun Pemantau Jetty (Pelabuhan Bongkar Muat)	37
Tabel 4.13 Data Uji Stasiun Pemantau Up Wind Ash Disposal	37
Tabel 4.14 Data Uji Stasiun Pemantau Down Wind Ash Disposal	38
Tabel 4.15 Karakteristik Emisi Model	39
Tabel 4.16 Data Meteorologi Model	39
Tabel 4.17 Hasil Perhitungan Laju Gas (g/detik) Emisi	41
Tabel 4.18 Hasil Perhitungan Tinggi Efektif Cerobong PT X	45
Tabel 4.19 Kategori Tingkat Pencemaran Udara Parameter Sulfur Dioksida	56
Tabel 4.20 Kategori Tingkat Pencemaran Udara Parameter Nitrogen Dioksida	61
Tabel 4.21 Baku Mutu Hg (Merkuri) di Udara Ambien di Beberapa Negara	65
Tabel 4.22 Hasil Perhitungan Konsentrasi Emisi Tertinggi SO ₂ di Musim Hujan	71
Tabel 4.23 Hasil Perhitungan Konsentrasi Emisi Tertinggi SO ₂ di Musim Kemarau	71
Tabel 4.24 Hasil Perhitungan Konsentrasi Emisi Tertinggi NO ₂ di Musim Hujan	71
Tabel 4.25 Hasil Perhitungan Konsentrasi Emisi Tertinggi NO ₂ di Musim Kemarau	71
Tabel 4.26 Hasil Perhitungan Konsentrasi Emisi Tertinggi Hg di Musim Hujan	72
Tabel 4.27 Hasil Perhitungan Konsentrasi Emisi Tertinggi Hg di Musim Kemarau	72
Tabel 4.28 Hasil Perhitungan Manual Untuk Titik Konsentrasi Maksimum	74
Tabel 4.29 Persen <i>Error</i> Perhitungan Manual dan Model Cerobong 1 Musim Hujan	76
Tabel 4.30 Persen <i>Error</i> Perhitungan Manual dan Model Cerobong 2 Musim Hujan	77
Tabel 4.31 Persen <i>Error</i> Perhitungan Manual dan Model Cerobong 1 Musim Kemarau	78
Tabel 4.32 Persen <i>Error</i> Perhitungan Manual dan Model Cerobong 2 Musim Kemarau	79
Tabel 4.33 Verifikasi Model dengan Hasil Uji Ambien Sulfur Dioksida Musim Hujan	87
Tabel 4.34 Verifikasi Model dengan Hasil Uji Ambien Sulfur Dioksida Musim Kemarau	87
Tabel 4.35 Verifikasi Model dengan Hasil Uji Ambien Nitrogen Dioksida Musim Hujan	88
Tabel 4.36 Verifikasi Model dengan Hasil Uji Ambien Nitrogen Dioksida Musim Kemarau	88

Tabel 4.37 Kelas Stabilitas Atmosfer dan Nilai *Plume Rise* dengan Variasi Kecepatan Angin 90

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Deposisi Asam oleh Sulfur Dioksida dan Nitrogen Oksida	5
Gambar 2.2 Siklus Hg di Lingkungan	6
Gambar 2.3 Baku Mutu Emisi PLTU	6
Gambar 2.4 Model Penyebaran Polutan dari Sumber Titik Berdasar Sebaran Gauss.....	8
Gambar 2.5 Model Penyebaran Polutan dari Sumber Titik Majemuk Berdasar Sebaran Gauss	9
Gambar 2.6 Gambaran Hasil Pola Dispersi Menggunakan Python.....	9
Gambar 2.7 Profil kecepatan angin di permukaan kota, suburban, dan daerah terbuka (a), serta pengaruh stabilitas (b,c,d,e).....	14
Gambar 2.8 Pengaruh Variasi Kecepatan Angin terhadap Konsentrasi.....	14
Gambar 2.9 Gambaran sistem koordinat kartesius dan kedudukan <i>point source</i> (S) dan reseptor (P)	15
Gambar 2.10 Gambaran Terjadinya <i>Plume Rise</i>	16
Gambar 3.1 Kerangka Penelitian.....	20
Gambar 4.1 Tampak Atas Cerobong PT X.....	27
Gambar 4.2 Data Curah Hujan Maret-Mei 2021 Stasiun Geofisika Pasuruan.....	30
Gambar 4.3 Data Curah Hujan Agustus-Oktober 2021 Stasiun Geofisika Pasuruan.....	30
Gambar 4.4 <i>Windrose</i> Stasiun Geofisika Pasuruan (Maret-Mei 2021).....	31
Gambar 4.5 <i>Windrose</i> Stasiun Geofisika Pasuruan (Agustus-Oktober 2021).....	31
Gambar 4.6 Tampak Atas Letak Stasiun Uji PT X (Februari dan April).....	32
Gambar 4.7 Tampak Atas Letak Stasiun Uji PT X (Agustus dan Oktober).....	32
Gambar 4.8 Tampak Atas Cerobong 1 PT X dan Titik Penerima Terdekat.....	43
Gambar 4.9 Tampilan Bahasa Pemrograman Python.....	46
Gambar 4.10 Grafik Sebaran Konsentrasi Sulfur Dioksida pada Cerobong 1 di Musim Hujan	48
Gambar 4.11 Grafik Sebaran Konsentrasi Sulfur Dioksida pada Cerobong 2 di Musim Hujan	48
Gambar 4.12 Grafik Sebaran Konsentrasi Sulfur Dioksida pada Cerobong 1 di Musim Kemarau.....	49
Gambar 4.13 Grafik Sebaran Konsentrasi Sulfur Dioksida pada Cerobong 2 di Musim Kemarau.....	49
Gambar 4.14 Grafik Sebaran Konsentrasi Nitrogen Dioksida pada Cerobong 1 di Musim Hujan	50
Gambar 4.15 Grafik Sebaran Konsentrasi Nitrogen Dioksida pada Cerobong 2 di Musim Hujan	51
Gambar 4.16 Grafik Sebaran Konsentrasi Nitrogen Dioksida pada Cerobong 1 di Musim Kemarau.....	51
Gambar 4.17 Grafik Sebaran Konsentrasi Nitrogen Dioksida pada Cerobong 2 di Musim Kemarau.....	52
Gambar 4.18 Grafik Sebaran Konsentrasi Merkuri pada Cerobong 1 di Musim Hujan	53
Gambar 4.19 Grafik Sebaran Konsentrasi Merkuri pada Cerobong 2 di Musim Hujan	53
Gambar 4.20 Grafik Sebaran Konsentrasi Merkuri pada Cerobong 1 di Musim Kemarau	54
Gambar 4.21 Grafik Sebaran Konsentrasi Merkuri pada Cerobong 2 di Musim Kemarau	54
Gambar 4.22 Titik Sebaran Tertinggi Musim Hujan.....	55

Gambar 4.23 Titik Sebaran Tertinggi Musim Kemarau	55
Gambar 4.24 Pola Sebaran Sulfur Dioksida di Musim Hujan	57
Gambar 4.25 Pola Sebaran Sulfur Dioksida di Musim Kemarau	58
Gambar 4.26 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida di Musim Hujan	59
Gambar 4.27 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida di Musim Kemarau.....	60
Gambar 4.28 Pola Sebaran Nitrogen Dioksida di Musim Hujan	62
Gambar 4.29 Pola Sebaran Nitrogen Dioksida di Musim Kemarau	62
Gambar 4.30 Kontur Dispersi Nitrogen Dioksida di Musim Hujan.....	63
Gambar 4.31 Kontur Dispersi Nitrogen Dioksida di Musim Kemarau.....	64
Gambar 4.32 Pola Sebaran Merkuri di Musim Hujan	66
Gambar 4.33 Pola Sebaran Merkuri di Musim Kemarau.....	66
Gambar 4.34 Kontur Dispersi Merkuri di Musim Hujan	67
Gambar 4.35 Kontur Dispersi Merkuri di Musim Kemarau	68
Gambar 4.36 Tampak Atas Titik Penerima Tertinggi di Musim Hujan	70
Gambar 4.37 Tampak Atas Titik Penerima Tertinggi di Musim Kemarau	70
Gambar 4.38 Pola Sebaran Sulfur Dioksida Arah Angin Ambien Musim Hujan	80
Gambar 4.39 Pola Sebaran Sulfur Dioksida Arah Angin Ambien Musim Kemarau	81
Gambar 4.40 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida Arah Angin Ambien Musim Hujan.....	82
Gambar 4.41 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida Arah Angin Ambien Musim Kemarau.....	83
Gambar 4.42 Pola Sebaran Nitrogen Dioksida Arah Angin Ambien Musim Hujan	84
Gambar 4.43 Pola Sebaran Nitrogen Dioksida Arah Angin Ambien Musim Kemarau	84
Gambar 4.44 Kontur Dispersi Nitrogen Dioksida Arah Angin Ambien Musim Hujan	85
Gambar 4.45 Kontur Dispersi Nitrogen Dioksida Arah Angin Ambien Musim Kemarau.....	86
Gambar 4.46 Pola Sebaran SO ₂ Musim Hujan Kecepatan Angin 1,42 m/s.....	90
Gambar 4.47 Pola Sebaran SO ₂ Musim Hujan Kecepatan Angin 2,5 m/s.....	91
Gambar 4.48 Pola Sebaran SO ₂ Musim Hujan Kecepatan Angin 4 m/s.....	91
Gambar 4.49 Pola Sebaran SO ₂ Musim Hujan Kecepatan Angin 5,5 m/s	92
Gambar 4.50 Pola Sebaran SO ₂ Musim Hujan Kecepatan Angin 6,5 m/s	92
Gambar 4.51 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida di Musim Hujan (Kecepatan Angin = 1,42 m/s)	93
Gambar 4.52 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida di Musim Hujan (Kecepatan Angin = 2,5 m/s)	93
Gambar 4.53 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida di Musim Hujan (Kecepatan Angin = 4 m/s)	94
Gambar 4.54 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida di Musim Hujan (Kecepatan Angin = 5,5 m/s)	94
Gambar 4.55 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida di Musim Hujan (Kecepatan Angin = 6,5 m/s)	95

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkit listrik merupakan salah satu teknologi yang dapat memenuhi kebutuhan energi listrik. Energi listrik dapat dihasilkan dari bermacam sumber energi salah satunya pembangkit listrik tenaga uap. Pembangkit listrik tenaga uap saat ini merupakan pilihan pemerintah dalam menanggulangi krisis listrik nasional. Melihat ketersediaan sumber daya alam batu bara yang melimpah, suplai energi listrik di Indonesia lebih dari 75% menggunakan batu bara sebagai bahan bakar (Rahman dan Marampa, 2017). Akan tetapi, pembakaran batu bara sebagai bahan bakar dapat mengurangi kualitas udara serta memberikan efek negatif terhadap gas rumah kaca pada atmosfer bumi (Sasmita dkk., 2021).

PT X merupakan salah satu unit pembangkit yang beroperasi di pulau Jawa, Indonesia. Proses produksi di unit tersebut menggunakan pembangkit utama berbahan bakar batu bara. Penggunaan batu bara tersebut menghasilkan beberapa parameter emisi yang dapat menyebar ke beberapa kawasan yang berada sekitar *plant* melalui cerobong. Hal tersebut tentunya perlu dilakukan pemantauan dan pengendalian, mengingat akan berdampak buruk bagi lingkungan apabila teknologi *Electrostatic Precipitator* (EP) bermasalah dan membutuhkan *corrective maintenance* (Arif dkk., 2020). Walaupun teknologi EP sendiri memiliki keunggulan dengan efisiensinya yang tingginya mencapai lebih dari 90% dalam menangkap abu sisa pembakaran yang berada dalam gas buang (Palit dkk., 2017).

Analisis sebaran pencemar udara dari sumber perlu dilakukan dalam upaya mengestimasi dampak yang dapat terjadi. Beberapa model yang dapat digunakan dalam memodelkan sebaran pencemar antara lain adalah model Gauss, model Lagrangian, model Eulerian, dan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Akan tetapi, model Gauss merupakan model yang paling mudah dan dianggap tepat untuk melukiskan secara matematis pola 3 dimensi dari perjalanan semburan (*plume*) emisi (De Visscher, 2014; Qipra Galang Kualita, 2007). Model matematika tersebut dianggap dapat dijalankan secara cepat yang dapat diperoleh dengan suatu model analitik karena tidak memerlukan waktu komputasi yang lama (Sulaiman & Sadly, 2014).

Berdasarkan penjelasan di atas, penelitian ini dilakukan pemodelan dispersi menggunakan model umum dispersi Gauss. Emisi yang diteliti adalah sulfur dioksida, nitrogen oksida, dan merkuri yang disesuaikan dengan baku mutu yang dipersyaratkan. Melalui model dispersi, dapat diperkirakan konsentrasi emisi di berbagai titik berdasarkan kondisi meteorologi daerah bersangkutan menggunakan perhitungan empiris. Selain itu, dapat didapatkan analisis sebaran maksimal untuk konsentrasi tertinggi dari sumber emisi. Selanjutnya dapat dibuat kontur sebaran emisi dari perhitungan yang telah dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python disesuaikan dengan peta wilayah industri. Selain itu, perhitungan model dispersi Gauss termodifikasi oleh beberapa rumus pendekatan lainnya seperti arah angin. Dengan demikian, didapatkan model sebaran emisi di sekitar industri dengan memanfaatkan pemrograman yang dapat digunakan dengan mudah dan bebas.

1.2 Rumusan Masalah

Untuk mendapatkan model sebaran dalam memprediksi distribusi emisi SO_2 , NO_x , dan Hg di PT X maka dirumuskan beberapa permasalahan yang dikaji penyelesaiannya dalam penelitian ini antara lain:

1. Bagaimana pola sebaran emisi SO_2 , NO_x , dan Hg berdasarkan model dispersi Gauss.

2. Berapa besar konsentrasi maksimum emisi SO₂, NO_x, dan Hg pada udara ambien berdasarkan model dispersi Gauss yang berasal dari cerobong PT X dengan lokasi penerimanya.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan pola sebaran emisi SO₂, NO_x, dan Hg berdasarkan model dispersi Gauss.
2. Mengidentifikasi nilai konsentrasi maksimum emisi SO₂, NO_x, dan Hg berdasarkan model dispersi Gauss yang berasal dari cerobong PT X beserta lokasi penerimanya.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah:

1. Lokasi penelitian berada di PT X.
2. Waktu pelaksanaan penelitian dimulai dari bulan Februari – Juli 2022.
3. Parameter yang diteliti adalah parameter spesifik berupa emisi SO₂, NO_x, dan Hg yang dihasilkan oleh cerobong PT X.
4. Baku mutu emisi mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019.
5. Profil dan deskripsi PT X, perkembangan perusahaan, proses penggunaan batu bara menjadi energi listrik, hingga menjadi emisi yang tersebar ke udara ambien.
6. Data primer berupa koordinat cerobong PT X dan koordinat stasiun pemantau kualitas udara sekitar PT X.
7. Data sekunder berupa hasil uji pada cerobong dan stasiun pemantau kualitas udara dalam 1 tahun pengujian PT X.
8. Data meteorologi stasiun Geofisika Pasuruan bulan Maret-Mei 2022 dan bulan Agustus-Oktober 2022.
9. Analisis sebaran emisi SO₂, NO_x, dan Hg menggunakan metode dispersi Gauss termodifikasi dengan bahasa pemrograman Python.
10. Penggunaan *software Google Earth* dan *Surfer 22* dalam pembuatan kontur dispersi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan masukan dalam analisis akademik dalam kegiatan pengelolaan kualitas udara di sekitar wilayah aktivitas industri khususnya PT X.
2. Sumbangan ilmiah dalam upaya estimasi sebaran emisi SO₂, NO_x, dan Hg dari kegiatan industri pembangkit listrik berbahan baku batu bara.
3. Sebagai rekomendasi bagi pengambil kebijakan dan instansi terkait pengendalian pencemaran udara untuk rekomendasi titik pemantauan kualitas udara.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gambaran Umum Wilayah

. PT X berdiri sebelum tahun 2000 yang selalu mengabdikan diri untuk Negara Kesatuan Republik Indonesia, serta mendorong perkembangan perekonomian nasional dengan menyediakan energi listrik yang bermutu tinggi, andal dan ramah lingkungan. PT X memiliki visi menjadi perusahaan terdepan dan terpercaya dalam bisnis energi terbarukan di Asia Tenggara. Dari visi tersebut, PT X selalu melakukan evaluasi dan inovasi dengan menerapkan tata pengelolaan perusahaan yang baik (*Good Corporate Governance*). Selain itu, PT X mengimplementasikan berbagai sistem manajemen *best practice* yang salah satunya menjamin kondisi lingkungan sekitar pembangkit.

PT X memiliki segmen usaha utama dalam hal Unit Pembangkitan (UP). PT X memiliki dua unit yang beroperasi dengan kapasitas terpasang masing-masing 400 MW dengan berbahan bakar batu bara. Perusahaan tersebut terletak di pulau Jawa, Indonesia. Keberadaan unit tersebut memegang peranan sangat penting dalam menyuplai energi listrik wilayah Jawa-Bali.

2.2 Pencemaran Udara Industri PLTU

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) PT X menggunakan batu bara sebagai bahan bakar utama. Penggunaan batu bara sebagai pembangkit listrik tenaga termal banyak digunakan karena efisiensinya tinggi sehingga menghasilkan energi listrik yang ekonomis (Yulinawati dkk., 2019). Batu bara digunakan untuk memanaskan air pada boiler yang nantinya akan menghasilkan uap air bertekanan guna menggerakkan turbin melalui proses pembakaran. Pembakaran tersebut akan menghasilkan debu sebagai sisa pembakaran batu bara yang dapat mengakibatkan pencemaran udara walaupun seperti pada umumnya PLTU telah menerapkan teknologi *Electrostatic Precipitator* (EP). Teknologi EP sendiri memiliki keunggulan dengan efisiensinya yang tingginya mencapai lebih dari 90% dalam menangkap abu sisa pembakaran yang berada dalam gas buang (Palit dkk., 2017).

Menurut Permenlhk No. 15 Tahun 2019, pencemaran udara adalah masuknya masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya. Pencemaran udara ikut andil dalam merangsang penyakit pernapasan seperti influenza, bronkitis, dan pneumonia serta penyakit kronis seperti asma dan bronchitis kronis (Muklis, 2009). Secara umum emisi yang dihasilkan dari industri PLTU diantaranya mengandung sulfur dioksida (SO₂), nitrogen oksida (NO_x), *partikulat matter* (PM), dan merkuri (Hg). Dengan demikian, setiap usaha dan atau kegiatan industri PLTU wajib menaati baku mutu emisi supaya tidak mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan manusia.

2.3 Sulfur Dioksida (SO₂)

Batu bara merupakan bahan baku energi yang sarat dengan masalah lingkungan, khususnya kandungan sulfur di dalamnya. Sulfur batu bara dapat menyebabkan kenaikan suhu global serta gangguan pernafasan. Sulfur dalam batu bara yang terbakar akan bereaksi dengan oksigen sehingga menghasilkan gas buang berupa senyawa SO₂ (Rahman dan Marampa, 2017). Gas ini memiliki karakteristik tidak berwarna dan berbau tajam

(Halulanga dkk., 2021). Senyawa tersebut merupakan salah satu parameter wajib yang harus dipenuhi oleh PLTU dalam mengeluarkan emisi gas buangnya.

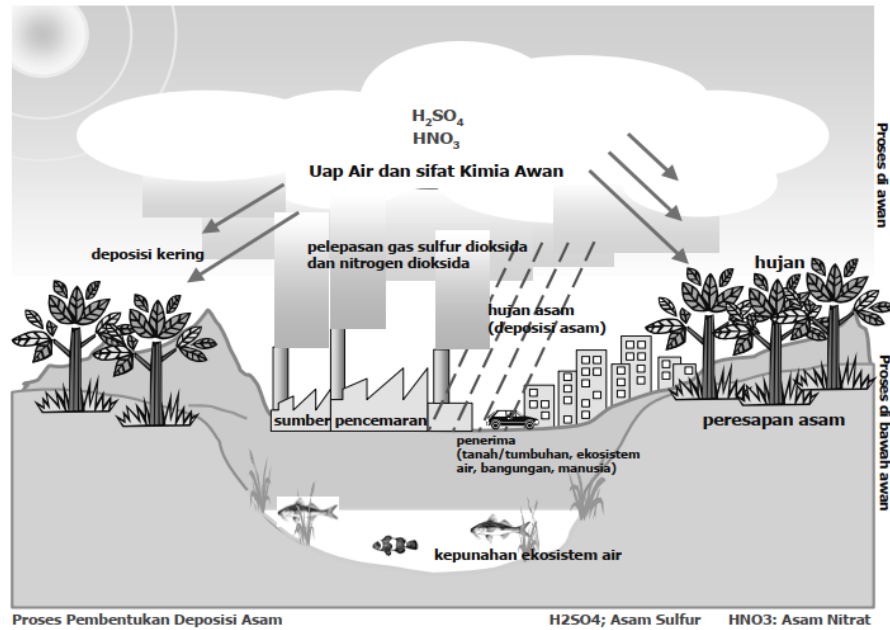
Gas sulfur dioksida merupakan senyawa yang berbahaya bagi lingkungan dan berdampak buruk pada manusia. Gas tersebut dengan konsentrasi tinggi dapat membunuh jaringan pada daun. SO₂ di udara akan berubah menjadi asam sulfat (H₂SO₄) yang menyebabkan noda putih atau coklat pada permukaan daun setelah bereaksi dengan air. Peristiwa tersebut biasanya disebut hujan asam yang juga menyebabkan turunnya pH tanah, air, rawa, dan matinya beberapa jenis biota air (Halulanga dkk., 2021). Terbentuknya asam sulfat juga dapat menyebabkan korosi pada logam, bangunan, seperti bangunan dari semen, batu-batuan candi, menara, dan tekstil (Pratomo, 2019). Selanjutnya, dampak SO₂ pada manusia antara lain iritasi saluran pernapasan dan penurunan fungsi paru dengan gejala batuk, sesak napas, meningkatkan penyakit asma, bahkan berujung pada kematian.

2.4 Nitrogen Oksida (NO_x)

Nitrogen oksida (NO_x) adalah sekelompok gas nitrogen yang terdiri dari nitrogen monoksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO₂) di atmosfer (Karomah dan Wilaha, 2019). Sama seperti sulfur dioksida saat terjadi hujan asam, ketika gas NO_x bereaksi dengan air hujan nantinya akan menghasilkan senyawa asam yaitu HNO₃. Emisi yang bersifat asam ini akan turun dari atmosfer ke permukaan bumi dengan cara basah dan kering yang disebut dengan deposisi basah dan deposisi kering. Deposisi basah terjadi jika senyawa larut melalui air hujan, salju, dan kabut sebelum turun ke permukaan bumi. Sedangkan deposisi kering terjadi ketika zat berupa butiran-butiran halus berterbangan oleh bantuan angin kemudian turun ke bumi. Dampak yang ditimbulkan nitrogen oksida sangat berbahaya bagi makhluk hidup, vegetasi, dan struktur bangunan.

Tabel 2.1 Tabel dampak Deposisi Asam

Dampak terhadap :	Keterangan
Makhluk Hidup	<ul style="list-style-type: none"> • Punahnya beberapa jenis ikan • Mengganggu siklus makanan • Mengganggu pemanfaatan air untuk air minum, perikanan, pertanian • Menimbulkan masalah pada kesehatan pernafasan dan iritasi kulit
Vegetasi	<ul style="list-style-type: none"> • Perubahan keseimbangan nutrisi dalam tanah • Mengganggu pertumbuhan tanaman • Merusak tanaman • Menyuburkan pertumbuhan jamur madu yang dapat mengganggu pertumbuhan tanaman (menjadi layu)
Struktur Bangunan	<ul style="list-style-type: none"> • Melarutkan Kalsium Karbonat pada beton, lantai marmer • Melarutkan tembaga dan baja • Mempercepat korosi pada pipa saluran air • Mengikis bangunan candi dan patung

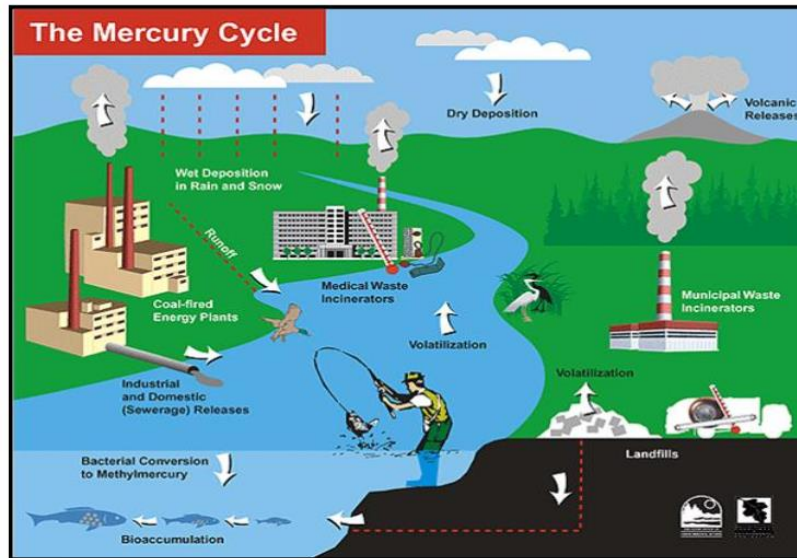


Gambar 2.1 Deposisi Asam oleh Sulfur Dioksida dan Nitrogen Oksida

2.5 Merkuri (Hg)

Kegiatan PLTU berpotensi menghasilkan logam merkuri (Hg) yang bersumber dari batu bara sebagai bahan bakunya. Berdasarkan laporan EPA (2000), batu bara memiliki kadar merkuri sekitar 50% dari emisi pembakarannya di PLTU meskipun persentase tersebut tetap bergantung pada sumber batubaranya. Lebih dari 99,5% merkuri dalam emisi cerobong berada dalam bentuk gas. Gas merkuri, termasuk dari unsur Hg (0) dan Hg (II), dianggap sebagai total emisi merkuri di atmosfer (Razi and Hiroshi, 2012).

Polutan Hg tidak dapat terdegradasi, maka emisi yang keluar terus menerus dari PLTU akan menyebabkan konsentrasi di lingkungan makin terakumulasi (Yulinawati dkk., 2019). Merkuri yang memiliki sifat yang persisten mampu mengalami bioakumulasi dan biomagnifikasi dalam rantai makanan (Suryono dan Pujilestari, 2019). Paparan merkuri yang tinggi dalam jangka panjang memiliki dampak antara lain kegelisahan, rasa malu yang berlebihan, anoreksia, masalah tidur kehilangan selera makan, iritabilitas, kelelahan, pelupa, tremor, gangguan penglihatan, dan gangguan pendengaran (ATSDR, 2016). Selain itu, merkuri berdampak langsung bagi kesehatan manusia dengan menyerang syaraf dan otak serta dapat masuk ke dalam tubuh manusia lewat makanan, air minum, atau melalui udara.



Gambar 2.2 Siklus Hg di Lingkungan

Sumber: Yulinawati dkk., 2019

2.6 Baku Mutu Emisi PLTU

Baku mutu adalah batas atau kadar makhluk hidup, zat atau energi atau komponen lain yang ada atau harus ada dan/atau unsur pencemar yang ditenggang adanya sesuai dengan peruntukannya. Baku mutu emisi pembangkit listrik tenaga termal khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) didasarkan oleh Peraturan menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No.15 Tahun 2019. Baku mutu emisi PLTU memiliki 4 parameter yang wajib untuk dipatuhi yaitu SO₂, NO_x, PM, dan Hg. Kadar maksimum setiap pencemar dihitung dengan satuan mg/Nm³ untuk bahan bakar batu bara.

NO	Parameter	Kadar Maksimum		
		Batubara (mg/Nm ³)	Minyak Solar (mg/Nm ³)	Gas (mg/Nm ³)
1	Sulfur Dioksida (SO ₂)	550	650	50
2	Nitrogen Oksida (NO _x)	550	450	320
3	Partikulat (PM)	100	75	30
4	Merkuri (Hg)	0,03	-	-

Gambar 2.3 Baku Mutu Emisi PLTU

Sumber: Permenlhk No.15 Tahun 2019

2.7 Dispersi Emisi

Pencemar di atmosfer secara prinsip akan mengalami perpindahan dengan beberapa mekanisme setelah dilepaskan dari sumbernya sehingga mengalami perubahan konsentrasi. Setelah bercampur dengan volume udara, pencemar akan mengalami pengenceran. Hipotesis pengenceran yang terjadi dapat dibedakan menurut waktu evolusi dan meteorologi lingkungan (kecepatan angin, densitas udara, temperatur, kelembaban, dan lain-lain). Perubahan konsentrasi pencemar dalam perubahan waktu dinyatakan dengan difusi-adveksi atau dispersi. Adveksi berhubungan dengan pergerakan media (atmosfer) atau karena adanya kecepatan angin, sedangkan difusi berhubungan dengan turbulensi dan perbedaan konsentrasi (Assomadi, 2016).

2.7.1 Model Dispersi

Secara umum terdapat empat model kualitas udara yang digunakan, yaitu: (1) model empiris atau statistik, model ini digunakan untuk menghubungkan data konsentrasi suatu lingkungan dengan lingkungan lain, misalnya *CAR-model*, suatu model untuk mengestimasi kepadatan lalu lintas dengan perubahan area; (2) model Gauss atau *plume-model*, merupakan model teori dasar penyebaran mengenai distribusi polutan karena turbulensi, model ini dapat digunakan pada skala lokal; (3) model Lagrangian, model untuk paket udara sebagai fungsi waktu sepanjang aliran *streamlines* dalam atmosfer. Model ini digunakan untuk menganalisis emisi polutan pada topografi yang kompleks, sedangkan aliran dan perubahan konsentrasinya dikaji secara *particularly*. Jenis model partikel Lagrangian merupakan satu level di atas model puff dan (4) model Eulerian, suatu model untuk menganalisis konsentrasi satu atau beberapa kotak, pergerakan dari kotak ke kotak dipengaruhi oleh kecepatan angin (Ruhiat, 2008).

2.7.2 Aplikasi Model untuk Menganalisis Konsentrasi Emisi

Untuk menganalisis sebaran emisi pencemar udara dari sumber dilakukan model. Suatu model untuk menganalisis sebaran pencemar udara digunakan model Gauss. Proses model *plume* Gauss cocok untuk mengidentifikasi hubungan input dan output dari data yang diuji (Sabin dkk, 2000). Persamaan dari model tersebut juga digunakan untuk menentukan konsentrasi polutan hasil dispersi cerobong asap pabrik di lokasi tertentu di sekitar cerobong asap. Pada model ini perilaku polutan mengikuti distribusi normal atau distribusi Gauss. Model Gauss secara luas digunakan untuk mengestimasi *impact* polutan non-reaktif dari sumber titik atau garis (Arya, 1999). Selain itu, model Gauss merupakan model yang paling mudah dan dianggap tepat untuk melukiskan secara matematis pola 3 dimensi dari perjalanan semburan (*plume*) emisi (De Visscher, 2014; Qipra Galang Kualita, 2007).

1. Pemodelan Sumber Tunggal (*Single Point Source*)

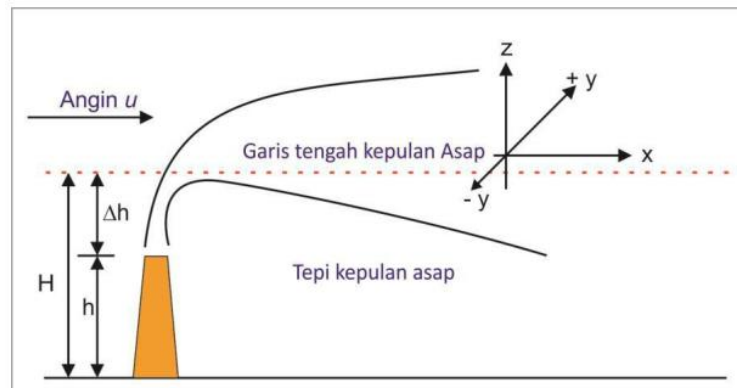
Model sebaran pencemar udara dari sumber titik disajikan pada Gambar 2.5. Pada model ini faktor lain yang dipertimbangkan yaitu stabilitas atmosfer yang mempengaruhi penyebaran polutan baik secara horizontal searah angin (*downwind*) maupun melintasi arah angin (*crosswind*). Formula dasar fungsi Gauss dapat digunakan secara tepat untuk mengestimasi distribusi polutan dari single source (Visscher, 2014). Model dispersi Gauss dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{u 2 \pi \sigma_y \sigma_z} e^{\left(\frac{-y^2}{2 \sigma_y^2}\right)} \left[e^{\left(\frac{-(z-H)^2}{2 \sigma_z^2}\right)} + e^{\left(\frac{-(z+H)^2}{2 \sigma_z^2}\right)} \right] \quad (2.1)$$

Keterangan:

- C = konsentrasi polutan pada suatu titik (x, y, z) (g/m³)
- Q = laju emisi (g/s)
- σ_y = Parameter dispersi arah horizontal (m)
- σ_z = Parameter dispersi arah vertikal (m)
- u = kecepatan angin rata-rata pada ketinggian cerobong (m/s)
- x = keputan horizontal dari sumber pencemar searah arah angin (m)
- y = keputan horizontal tegak lurus arah angin (m)

- z = keputan vertikal dari permukaan (m)
- H = ketinggian efektif ($H = h + \Delta h$) (m)
- Δh = *plume rise* (m)
- h = ketinggian cerobong (m)



Gambar 2.4 Model Penyebaran Polutan dari Sumber Titik Berdasar Sebaran Gauss

Sumber: Rahmadhani, 2017

Gambar 2.4 memberikan ilustrasi tentang pemodelan dispersi polutan dengan Gaussian *plume model*. Polutan bergerak searah dengan arah angin pada sumbu-x. Sumbu-y adalah arah tegak lurus horizontal dengan sumbu-x dan sumbu-z adalah vertikal dengan permukaan tanah. Pada proses difusi polutan, terjadi difusi tiga dimensi karena molekul-molekul polutan berdifusi pada sumbu-x, sumbu-y dan sumbu-z. Selain proses difusi, pada sumbu-x juga terjadi proses adveksi atau transportasi polutan yang diakibatkan oleh angin.

2. Pemodelan Sumber Majemuk (*Multiple Point Sources*)

Pemodelan sumber majemuk merupakan akumulasi dari beberapa sumber yang dianggap sebagai satu kesatuan sumber emisi yang dinyatakan dalam emisi per satuan area (Macdonald, 2003). Beberapa titik sumber dinyatakan sebagai *area sources* apabila jarak masing-masing titik kurang dari 100 m serta emisi yang dikeluarkan kurang dari 20% (EPA, 1992). Jika sumber emisi tidak termasuk kategori *area source*, maka dapat disebut sebagai *multiple point source*. Perhitungan model *multiple point source* dapat dihitung menggunakan perhitungan model *single point source*. Setelah itu diakumulasikan emisi dari beberapa sumber pada suatu penerima (Rahmadhani, 2017).

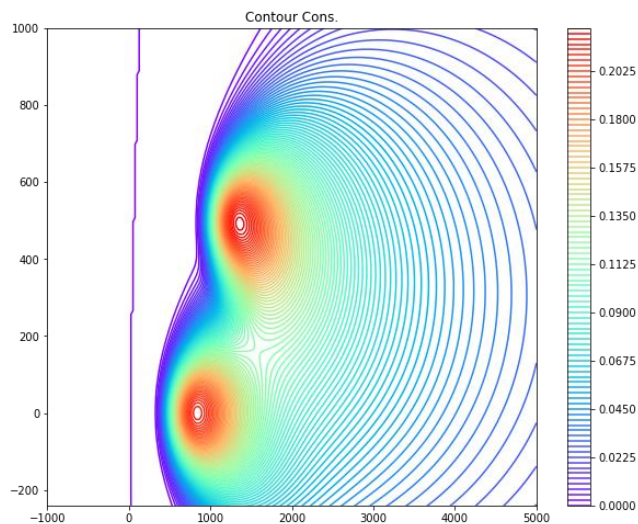


Gambar 2.5 Model Penyebaran Polutan dari Sumber Titik Majemuk Berdasar Sebaran Gauss

Sumber: Nurunnizar, 2020

2.7.3 Bahasa Pemrograman Python

Python adalah bahasa pemrograman interpretatif multiguna pada tingkat keterbacaan kode dengan filosofi perancangan. Walaupun merupakan salah satu bahasa pemrograman yang baru di masa sekarang, Python diklaim sebagai bahasa yang menggabungkan kapabilitas, kemampuan, dengan sintaksis kode yang sangat jelas, dan dilengkapi dengan fungsionalitas pustaka standar yang besar serta komprehensif. Python secara prinsip dapat diperoleh dan dipergunakan secara bebas, bahkan untuk kepentingan komersial. Python dapat membuat data yang masuk (input) untuk ditampilkan hasil data yang diinginkan (output) dengan cara penggunaan yang bervariasi (Syahrudin dan Kurniawan, 2018).



Gambar 2.6 Gambaran Hasil Pola Dispersi Menggunakan Python

2.7.4 Software Pembuatan Kontur Dispersi

Kontur dispersi merupakan tampilan garis yang berbentuk dalam menunjukkan sebaran emisi suatu sumber. Kontur dispersi dapat dimunculkan dengan berbagai macam *software* salah satunya adalah Surfer 22. Surfer merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk pembuatan peta kontur dan pemodelan tiga dimensi yang berdasarkan pada *grid*. *Grid* sendiri merupakan serangkaian garis

vertical dan horizontal yang digunakan sebagai dasar pembentuk kontur dan *surface* tiga dimensi (Munirwansyah dkk., 2013).

Data hasil *running* pemrograman Python dapat diterjemahkan oleh aplikasi Surfer 22. Setelah itu, gambar yang muncul di perangkat lunak tersebut dapat ditampilkan secara menarik dan terlihat *real* melalui *Google Earth*. *Google Earth* merupakan sebuah program *globe virtual* yang sebenarnya disebut *Earth Viewer*. Program ini dapat memetakan bumi dari superimposisi gambar yang dikumpulkan dari pemetaan satelit, fotografi udara dan *globe GIS 3D* (MAESTRO, 2010). Penggunaan *software Google Earth* dapat membantu menampilkan kontur dispersi dengan gradasi warna yang menunjukkan tingkat konsentrasi emisi yang berbeda.

2.8 Faktor yang Mempengaruhi Dispersi Emisi

Menurut Oke (1978), penyebaran emisi dari suatu sumber emisi selain dipengaruhi oleh karakteristik sumber emisi juga dipengaruhi oleh karakteristik meteorologi dan topografi setempat. Beberapa faktor lainnya adalah sebagai berikut.

2.8.1 Stabilitas Atmosfer

Klasifikasi stabilitas yang banyak digunakan adalah klasifikasi yang dikembangkan oleh Pasquill dan Gifford (PGT). Kategori PGT dihitung dari kecepatan angin (10 meter di atas permukaan) dan mendatangkan insolasi sebagai parameter pengembangan, dengan kategori (A = sangat tidak stabil, B = tidak stabil menengah, C = sedikit tidak stabil, D = netral, E = agak stabil, F = stabil) yang berhubungan dengan kurva σ_y (kualitas *plume lateral*) dan σ_z (kualitas *plume vertikal*) untuk difusi waktu rata-rata. Adapun kategori penentuan stabilitas tersebut disajikan pada Tabel 2.2 (Koehn, 2013).

Tabel 2.2 Kondisi Atmosfer dalam Berbagai Kelas Stabilitas

Kecepatan angin permukaan (m/det) ^a	Radiasi matahari siang hari			Keawanan malam hari	
	Kuat ^b	Sedang ^c	Rendah	Berawan ($\geq 4/8$) ^d	Cerah ($\leq 3/8$) ^e
<2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Keterangan:

^aKecepatan angin permukaan diukur pada ketinggian 10 meter di atas permukaan

^bSiang hari pada musim panas yang cerah dengan ketinggian matahari $> 60^\circ$ di atas garis horizon.

^cSiang hari musim panas sedikit gumpalan awan, atau siang hari cerah dengan ketinggian matahari $35^\circ - 60^\circ$ celcius di atas horizon.

^dSiang hari menjelang sore, atau siang hari musim panas yang berawan, atau siang hari musim panas dengan sudut ketinggian matahari $15^\circ - 35^\circ$

^eKeawanan didefinisikan sebagai fraksi dari penutupan langit oleh awan.

Sumber: Koehn, 2013

Kemudian, setelah mengetahui kelas stabilitas dapat ditentukan rumus parameter dispersi yang dapat digunakan. Menurut buku *Air Dispersion Modelling* terdapat 2 rumus parameter disperse tergantung dari daerah sebarannya. Berikut merupakan rumus untuk daerah rural dan urban.

Tabel 2.3 Persamaan Parameter Dispersi untuk Daerah Rural (Parameter Pasquill-Gifford)

Stability Class	σ_y (m)	σ_z (m)
A	$0.22x(1+0.0001x)^{-0.5}$	$0.2x$
B	$0.16x(1+0.0001x)^{-0.5}$	$0.12x$
C	$0.11x(1+0.0001x)^{-0.5}$	$0.08x(1+0.0002x)^{-0.5}$
D	$0.08x(1+0.0001x)^{-0.5}$	$0.06x(1+0.0015x)^{-0.5}$
E	$0.06x(1+0.0001x)^{-0.5}$	$0.03x(1+0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1+0.0001x)^{-0.5}$	$0.016x(1+0.0003x)^{-1}$

^ax is the distance to the source in meters.

Sumber: Visscher, 2014

Tabel 2.4 Persamaan Parameter Dispersi untuk Daerah Urban (Parameter Pasquill-Gifford)

Stability Class	σ_y (m)	σ_z (m)
A–B	$0.32x(1+0.0004x)^{-0.5}$	$0.24x(1+0.0001x)^{0.5}$
C	$0.22x(1+0.0004x)^{-0.5}$	$0.2x$
D	$0.16x(1+0.0004x)^{-0.5}$	$0.14x(1+0.0003x)^{-0.5}$
E–F	$0.11x(1+0.0004x)^{-0.5}$	$0.08x(1+0.0015x)^{-0.5}$

^ax is the distance to the source in meters.

Sumber: Visscher, 2014

Selain itu, dapat digunakan rumus lainnya dengan menggunakan rumusnya masing-masing dengan disesuaikan nilai a, b, c, dan d dari Tabel 2.5 dan Tabel 2.6.

$$\sigma_y = 465,11628 \cdot X \cdot \tan(\text{TH}) \quad (2.2)$$

$$\text{TH} = 0,017453293 \cdot [c - d \ln(X)] \quad (2.3)$$

$$\sigma_z = a \cdot x^b \quad (2.4)$$

keterangan:

σ_y = koefisien dispersi arah horizontal (m)

σ_z = koefisien dispersi arah vertikal (m)

X = jarak *downwind* (km)

Tabel 2.5 Parameter yang Digunakan dalam Perhitungan σ_y Pasquill-Gifford

Pasquill Stability Category	c	d
A	24.1670	2.5334
B	18.3330	1.8096
C	12.5000	1.0857
D	8.3330	0.72382
E	6.2500	0.54287
F	4.1667	0.36191

Sumber: EPA, 1995

Tabel 2.6 Parameter yang Digunakan dalam Perhitungan σ_z Pasquill-Gifford

Pasquill Stability Category	x (km)	a	b
A*	<.10	122.800	0.94470
	0.10 - 0.15	158.080	1.05420
	0.16 - 0.20	170.220	1.09320
	0.21 - 0.25	179.520	1.12620
	0.26 - 0.30	217.410	1.26440
	0.31 - 0.40	258.890	1.40940
	0.41 - 0.50	346.750	1.72830
	0.51 - 3.11	453.850	2.11660
	>3.11	**	**
B*	<.20	90.673	0.93198
	0.21 - 0.40	98.483	0.98332
	>0.40	109.300	1.09710
C*	All	61.141	0.91465
D	<.30	34.459	0.86974
	0.31 - 1.00	32.093	0.81066
	1.01 - 3.00	32.093	0.64403
	3.01 - 10.00	33.504	0.60486
	10.01 - 30.00	36.650	0.56589
	>30.00	44.053	0.51179

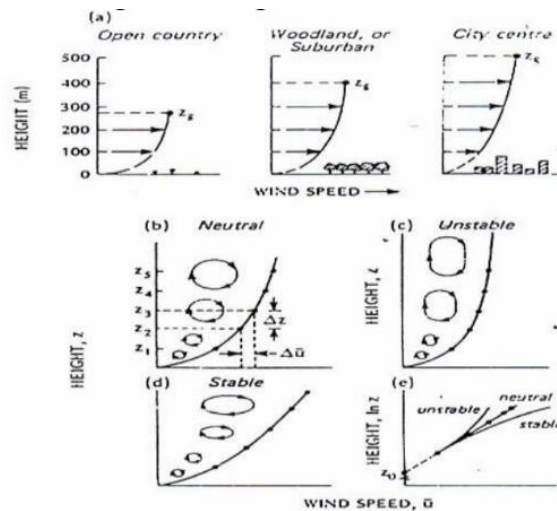
E	<.10	24.260	0.83660
	0.10 - 0.30	23.331	0.81956
	0.31 - 1.00	21.628	0.75660
	1.01 - 2.00	21.628	0.63077
	2.01 - 4.00	22.534	0.57154
	4.01 - 10.00	24.703	0.50527
	10.01 - 20.00	26.970	0.46713
	20.01 - 40.00	35.420	0.37615
	>40.00	47.618	0.29592
F	<.20	15.209	0.81558
	0.21 - 0.70	14.457	0.78407
	0.71 - 1.00	13.953	0.68465
	1.01 - 2.00	13.953	0.63227
	2.01 - 3.00	14.823	0.54503
	3.01 - 7.00	16.187	0.46490
	7.01 - 15.00	17.836	0.41507
	15.01 - 30.00	22.651	0.32681
	30.01 - 60.00	27.074	0.27436
	>60.00	34.219	0.21716

* If the calculated value of F_z exceed 5000 m, F_z is set to 5000 m.

** F_z is equal to 5000 m.

Sumber: EPA, 1995

Profil kecepatan angin vertikal antara urban, pedesaan atau sub-urban serta permukaan terbuka ditunjukkan pada Gambar 2.8(a). Pada ketinggian yang sama untuk ketiga jenis permukaan menunjukkan kecepatan angin yang berbeda. Wilayah yang lebih kasap, perubahan kecepatan angin antar ketinggiannya kecil, karena terjadi tolakan yang mengakibatkan kecepatan angin lebih homogen. Pada Gambar 2.8(b) menunjukkan pengaruh stabilitas terhadap profil kecepatan angin. Pada kondisi stabil perbedaan antara kecepatan angin ketinggian lebih besar dibandingkan dengan kondisi netral dan tidak stabil.

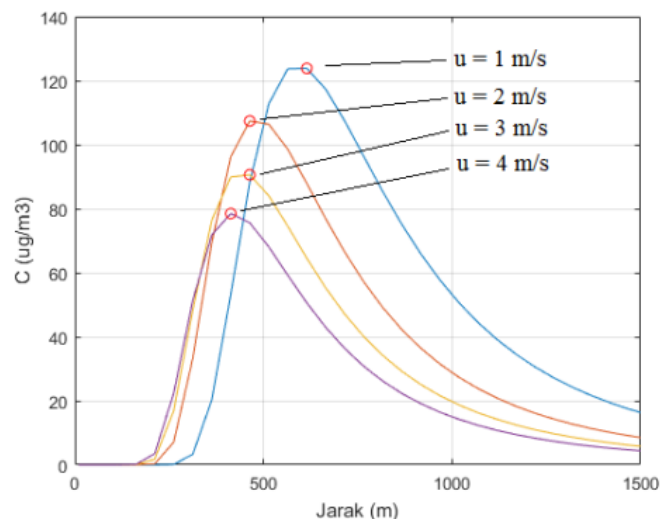


Gambar 2.7 Profil kecepatan angin di permukaan kota, suburban, dan daerah terbuka (a), serta pengaruh stabilitas (b,c,d,e)

Sumber: Oke, 1978

2.8.2 Arah dan Kecepatan Angin

Sebaran polutan di udara disebabkan banyak faktor, diantaranya adalah arah dan kecepatan angin. Arah dan kecepatan angin dapat diukur menggunakan anemometer (Magidi, 2013). Polutan di udara menyebar secara horizontal dan vertikal karena arah dan kecepatan angin. Arah angin berpengaruh pada kemana arah penyebaran emisi dari cerobong. Kecepatan angin yang besar dapat menjadikan polutan mengalami pengenceran yang besar seperti yang diilustrasikan pada penelitian Assegaf (2018).



Gambar 2.8 Pengaruh Variasi Kecepatan Angin terhadap Konsentrasi

Sumber: Assegaf, 2018

Dalam pemodelan dispersi, dibutuhkan data dan kecepatan angin pada beberapa titik ketinggian. Untuk mendapatkan data kecepatan angin yang berasal dari satu titik ketinggian untuk kebutuhan beberapa titik dapat digunakan persamaan berikut untuk mengkonversi data kecepatan angin ke berbagai titik ketinggian.

$$u_2 = u_1 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^p \quad (2.5)$$

Keterangan:

u_1 dan u_2 = kecepatan angin pada ketinggian 1 dan ketinggian 2 (m/s)

z_1 dan z_2 = ketinggian 1 dan ketinggian 2 (m)

p = fungsi stabilitas atmosfer

(Newman & Klein, 2014).

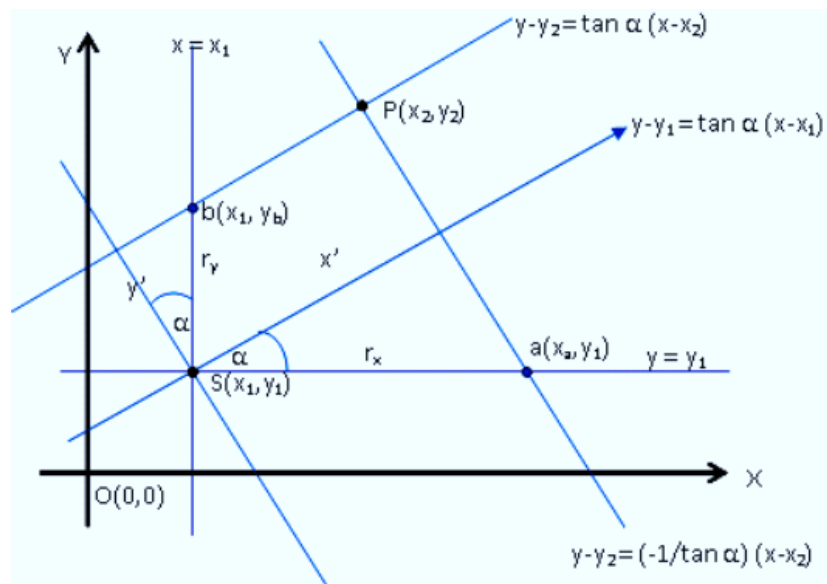
Berikut adalah tabel untuk menentukan nilai p pada persamaan diatas.

Tabel 2.7 Nilai p untuk Persamaan Perkiraan Kecepatan Angin

Kelas Stabilitas	P (kota)	P (desa)
A	0,11	0,15
B	0,12	0,15
C	0,12	0,20
D	0,27	0,25
E	0,29	0,40
F	0,45	0,69

Sumber: Beyhock, 2005

Selain itu, arah angin akan menentukan titik penerima mana saja yang terkena penyebaran emisi. Penentuan titik penerima tersebut akan menghasilkan jarak *downwind* (X) dari sumber emisi. Menggunakan konsep sistem koordinat kartesius, didapatkan formula perhitungan dengan pendekatan baru dalam bentuk persamaan sebagai berikut (Assomadi, 2016).



Gambar 2.9 Gambaran sistem koordinat kartesius dan kedudukan *point source* (S) dan reseptor (P)

$$y' = (y_2 - y_1) \cos \alpha + (x_1 - x_2) \sin \alpha \quad (2.6)$$

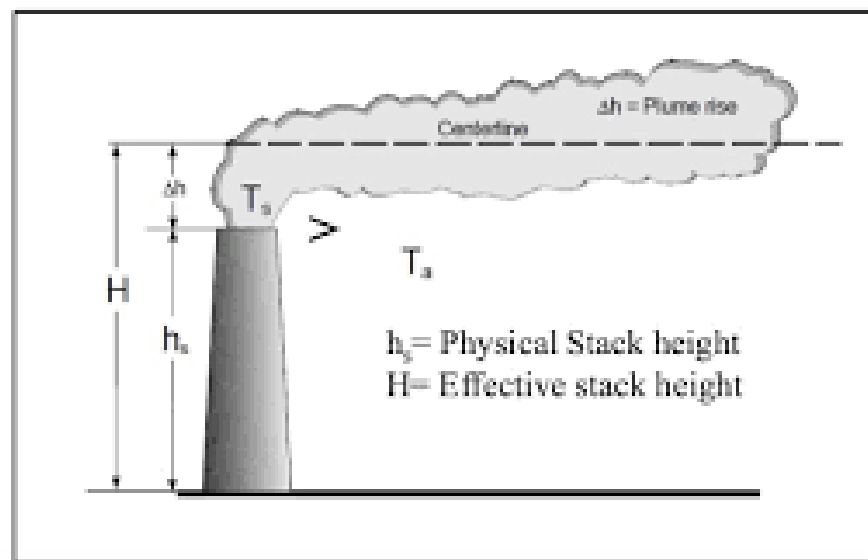
$$x' = (x_2 - x_1) \cos \alpha - (y_1 - y_2) \sin \alpha \quad (2.7)$$

Keterangan:

- y' = koordinat vertikal baru
- x' = koordinat horizontal baru
- y2 = jangkauan emisi vertikal
- y1 = koordinat vertikal sumber emisi
- x2 = jangkauan emisi horizontal
- x1 = koordinat horizontal sumber emisi
- α = derajat arah angin

2.8.3 Plume Rise

Plume rise terjadi ketika gas meninggalkan cerobong, hal ini terjadi karena faktor *buoyancy* dan momentum. *Buoyancy flux* merupakan pemuain gas karena perbedaan temperatur sedangkan momentum terjadi karena perbedaan kecepatan gas yang tinggi ketika keluar dari cerobong (Visscher, 2014). Ada berbagai macam persamaan dalam menghitung *plume rise* yang dapat ditemukan dalam banyak literatur. *The Environmental Protection Agency* (EPA) atau disebut Badan Perlindungan Lingkungan merekomendasikan untuk menggunakan persamaan Brigg dalam menghitung *plume rise*. Berikut merupakan persamaan perhitungan yang digunakan untuk memprediksi tinggi *plume rise* (EPA 1995).



Gambar 2.10 Gambaran Terjadinya *Plume Rise*

$$Fb = \frac{g \cdot ws \cdot ds^3 (Ts - Ta)}{4 \cdot Ts} \quad (2.8)$$

$$X^* = 14 Fb^{\frac{5}{8}} \quad \text{jika } Fb < 55 \text{ m}^4/\text{s}^3 \quad (2.9)$$

$$X^* = 34 Fb^{\frac{2}{5}} \quad \text{jika } Fb \geq 55 \text{ m}^4/\text{s}^3 \quad (2.10)$$

$$Xf = 3,5 \cdot X^* \quad (2.11)$$

$$\Delta h = \frac{1,6 Fb^{\frac{1}{3}} X^{\frac{2}{3}}}{u^2} \quad \text{jika } X^* < Xf \quad (2.12)$$

$$\Delta h = \frac{1,6 Fb^{\frac{1}{3}} Xf^{\frac{2}{3}}}{u^2} \quad \text{jika } X^* \geq Xf \quad (2.13)$$

Keterangan:

Fb	= <i>buoyancy flux</i> (m^4/s^3)
g	= percepatan gravitasi ($9,81 m/s^2$)
ws	= kecepatan emisi saat keluar dari cerobong (m/s)
ds	= diameter dalam cerobong (m)
Ts	= temperatur gas keluar cerobong (K)
Ta	= temperatur udara ambien (K)
X*	= <i>downward distance</i> (m)
Xf	= jarak transisi level kepulan (m)
u ₂	= kecepatan angin di ujung cerobong (m/s)
Δh	= <i>plume rise</i> (m)

2.8.4 Suhu Udara dan Tutupan Awan

Suhu udara dan tutupan awan dalam proses dispersi zat pencemar akan mempengaruhi stabilitas udara. Gradien perubahan suhu udara akan berpengaruh sangat kuat terhadap kestabilan atmosfer. Pada proses dispersi stabilitas udara akan mempengaruhi tipe atau bentuk polutan ke daerah penerima. Terdapat beberapa kondisi atmosfer dalam kaitannya dengan stabilitas udara, yaitu kondisi tidak stabil terjadi apabila laju penurunan suhu di lingkungan lebih besar dari laju penurunan suhu udara kering yang sifatnya konstan, kondisi stabil terjadi bila laju penurunan suhu udara kering, dan kondisi netral terjadi bila laju penurunan suhu lingkungan sama dengan laju penurunan suhu udara kering (Rahmawati, 1999). Selain itu, tutupan awan berkorelasi negatif dengan nilai radiasi matahari. Dengan demikian, semakin besar nilai tutupan awan maka semakin kecil nilai radiasi matahari (Anggreni, 2018).

2.8.5 Kondisi Topografi

Kondisi topografi suatu wilayah akan mempengaruhi angin dan suhu udara di atasnya. Perbedaan penerimaan radiasi matahari antara datar dan berlereng menyebabkan terjadinya pola aliran udara yang mengikuti perbedaan suhu dan tekanan udara di atasnya. Pengaruh topografi cukup rumit, sehingga perlu mengenali jenis dataran dengan kriterianya. Pada dasarnya perlu dibedakan antara puncak yang terisolasi, yaitu rangkaian dataran yang cukup besar untuk memodifikasi aliran udara ke atas maupun ke bawah, dan dataran tinggi yang membentuk penghalang utama untuk gerakan udara dan memiliki iklim sendiri. Dataran yang tinggi mengalami suhu yang hampir sama dengan udara bebas pada ketinggian yang sama, sementara dataran tinggi dipanaskan dan didinginkan oleh proses radiasi. Lembah di antara dataran tinggi memiliki atmosfer tertutup yang secara diurnal dimodifikasi oleh pendinginan malam hari, khususnya di musim dingin dan dinaikkan (suhunya) oleh pemanasan siang hari (Rahmadhani, 2017). Wilayah dengan topografi datar, pola anginnya relatif tidak mengalami gangguan, pengaruh topografi datar terhadap dispersi dan lintasan kepulan sangat kecil (Ruhiat, 2008).

Halaman ini sengaja dikosongkan

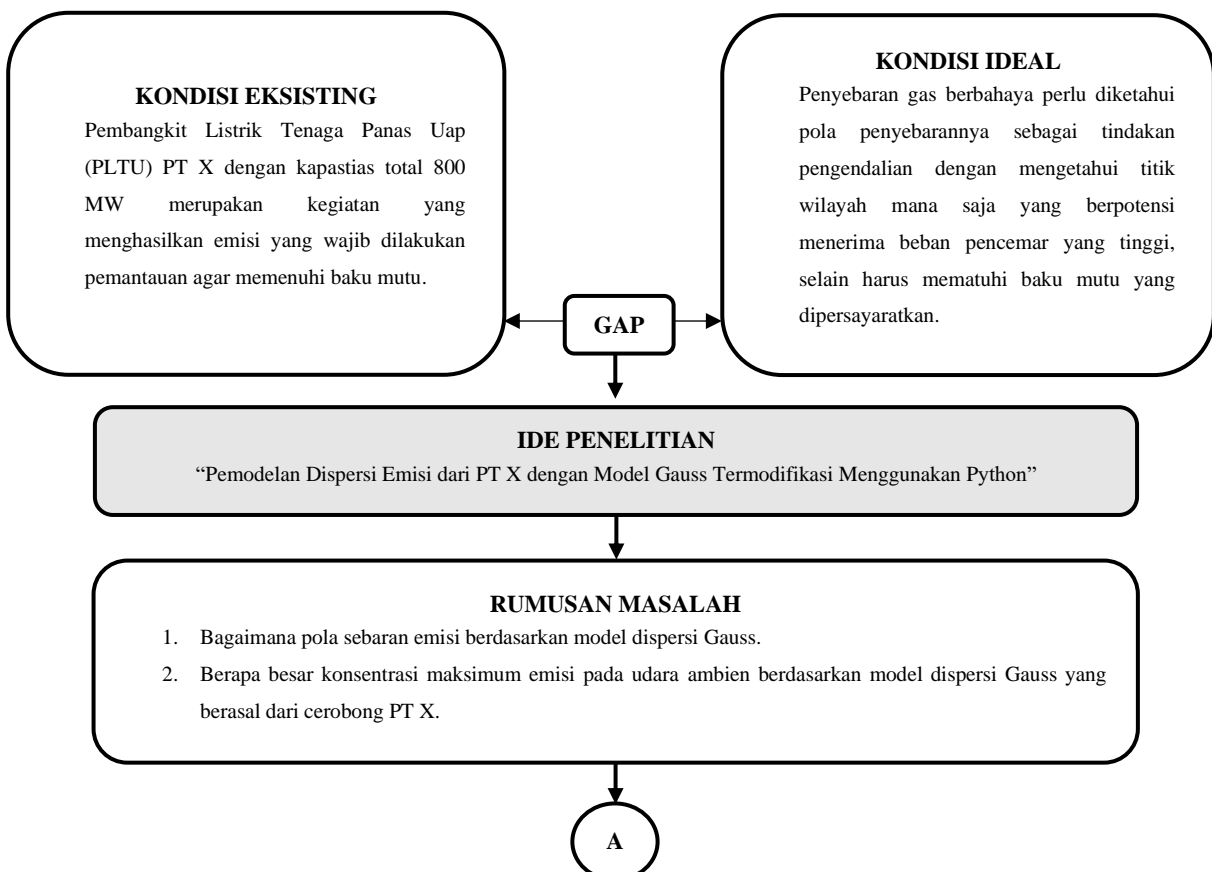
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

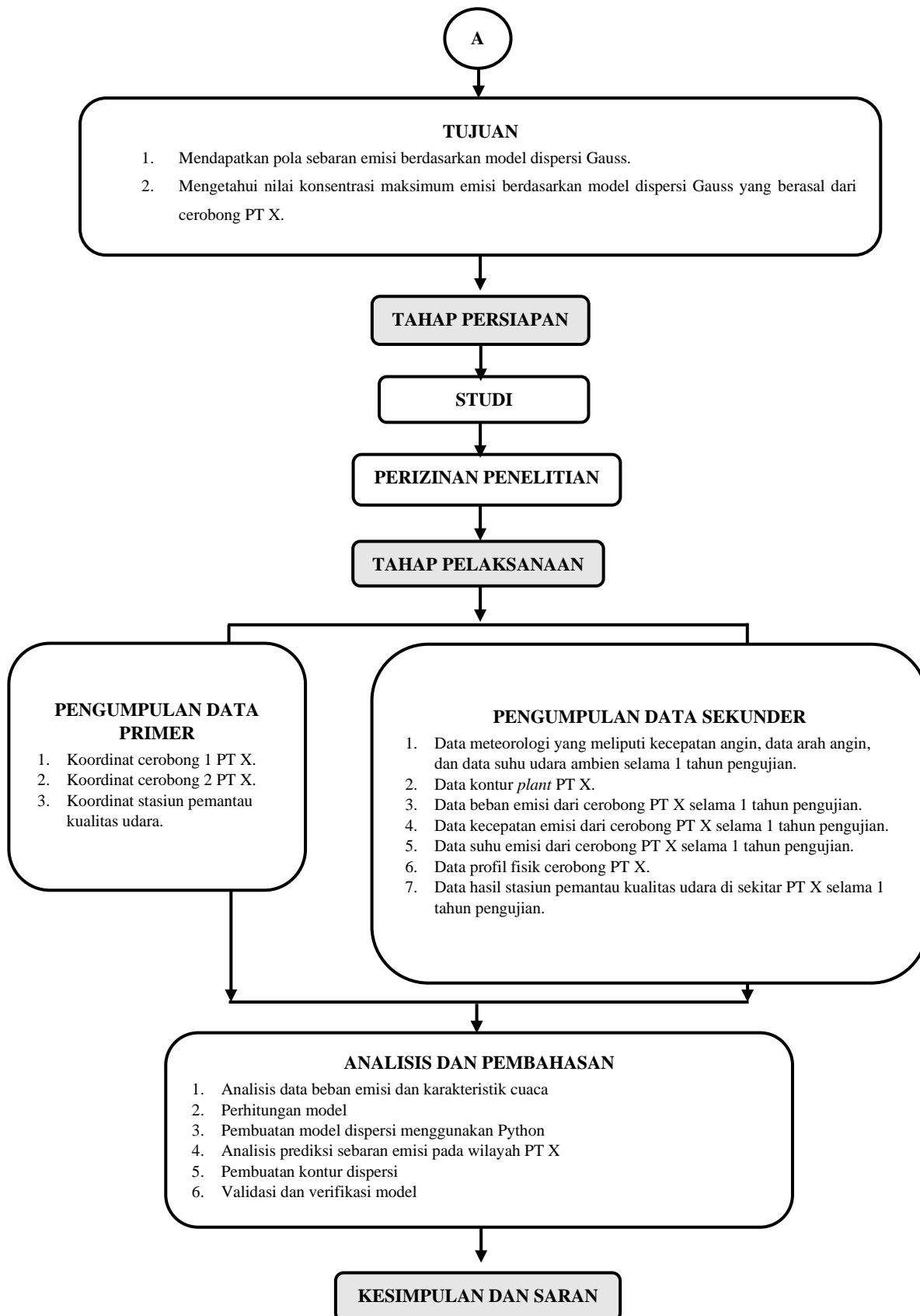
3.1 Gambaran Umum Penelitian

Penyusunan metodologi penelitian diperlukan untuk mendapatkan gambaran tahapan yang sistematis dari penelitian. Penelitian ini dilakukan untuk menampilkan pemodelan dispersi emisi SO_2 , NO_x , dan Hg yang dihasilkan oleh PT X serta menampilkan konsentrasi maksimumnya. Alasan beberapa parameter emisi tersebut diteliti karena merupakan parameter baku mutu emisi untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. 15 Tahun 2019. Analisis dilakukan dengan metode dispersi Gauss yang merupakan salah satu metode pemodelan sebaran polutan. Pemodelan dibantu dengan bahasa pemrograman Python yang dapat digunakan dengan mudah dan bebas. Selanjutnya, kontur yang telah dihasilkan dapat di-*overlay* secara *real* dengan *Google Earth* memakai bantuan aplikasi Surfer 22. Hasil dari pemodelan dispersi emisi SO_2 , NO_x , dan Hg dapat digunakan sebagai referensi ilmiah terkait pengendalian pencemaran udara untuk rekomendasi titik pemantauan kualitas udara.

3.2 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian merupakan tahapan awal yang harus dilakukan dengan menyusun langkah-langkah agar penelitian lebih sistematis dan mudah dipahami. Kerangka penelitian ini disusun berdasarkan kondisi eksisting serta kondisi ideal yang melahirkan ide penelitian. Untuk mencapai ide penelitian tersebut diperlukan melakukan tahap persiapan, tahap pelaksanaan, serta kesimpulan dan saran yang sesuai dengan ide penelitian. Rangkaian penelitian dari tahap persiapan sampai tahap kesimpulan dan saran dilihat pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Kerangka Penelitian

3.3 Ide Penelitian

Konsentrasi emisi yang melebihi standar dapat menyebabkan gangguan kesehatan bagi manusia, hewan serta dapat mengurangi produktivitas tumbuhan. Salah satu upaya pemantauan kualitas udara di suatu wilayah karena adanya aktivitas industri dapat dipantau melalui pembuatan model dispersi emisi pada PT X. Dengan data primer koordinat sumber emisi dan data sekunder kualitas serta kuantitas emisi dapat diketahui sebaran konsentrasi emisi pada jarak tertentu di sekitar wilayah penelitian. Sebaran emisi tersebut didapatkan dengan melakukan pendekatan model Gauss yang dibantu dalam bahasa pemrograman Python. Dengan demikian, dapat dilakukan berbagai macam opsi pengendalian berdasarkan informasi pemodelan terhadap wilayah penerima emisi.

3.4 Tahap Persiapan

Sebelum melaksanakan penelitian, terdapat beberapa hal yang perlu dipersiapkan agar penelitian dilakukan dengan lancar. Tahap persiapan dimulai dari studi literatur dan perizinan penelitian. Berikut penjelasan tahap persiapan pada penelitian ini.

3.4.1 Studi Literatur

Literatur digunakan sebagai landasan teori dan pedoman dasar penelitian untuk mendukung jalannya penelitian. Studi literatur dilakukan untuk memperoleh dasar teori yang jelas dan kuat sehingga dapat membantu saat analisis data dan pembahasan dapat diperoleh suatu kesimpulan dari hasil penelitian ini. Pelaksanaan studi literatur yaitu dengan cara mengumpulkan data atau informasi yang diperlukan dalam pelaksanaan penelitian ini yang berbentuk pustaka. Sumber literatur yang digunakan sebagai acuan antara lain jurnal ilmiah, laporan penelitian, artikel, dan buku-buku yang relevan dengan penelitian. Dari berbagai macam sumber literatur tersebut diperoleh sumber informasi yang berkaitan dengan penelitian yang meliputi data sebagai berikut:

1. Gambaran umum wilayah studi.
2. Penggunaan batu bara sebagai bahan bakar PLTU.
3. Sifat emisi SO_2 , NO_x , dan Hg.
4. Dampak pencemaran udara pada PLTU terhadap lingkungan.
5. Baku mutu parameter emisi SO_2 , NO_x , dan Hg.
6. Penyebaran pencemaran udara.
7. Model dispersi Gauss dalam bentuk gas.
8. Faktor-faktor yang mempengaruhi sebaran emisi.
9. Bahasa pemrograman Python.

3.4.2 Perizinan Penelitian

Perizinan dilakukan untuk mendapatkan data sekunder terkait hasil uji pencemar SO_2 , NO_x , dan Hg pada cerobong PT X. Surat izin penelitian dibuat atas nama Departemen Teknik Lingkungan ITS, yang ditujukan kepada PH General Manager PT X. Setelah mendapat izin penelitian dari perusahaan, data primer dan data sekunder dapat diperoleh dari perusahaan. Data primer didapatkan dengan memantau langsung ke perusahaan yang kemudian disesuaikan dengan *Google Earth*. Sedangkan data sekunder merupakan data inventaris perusahaan sebagai input pemodelan dispersi menggunakan metode Gauss. Penggabungan data primer dan data sekunder dapat dilakukan untuk memodelkan dispersi pencemar yang disyaratkan oleh baku mutu ambien.

3.5 Tahap Pelaksanaan

Tahap pelaksanaan penelitian dimulai dari pengumpulan data serta dilanjutkan analisis dan pembahasan. Berikut penjelasan tahap pelaksanaan penelitian.

3.5.1 Pengumpulan Data

Dalam melakukan penelitian ini, diperlukan suatu data dan informasi yang mendukung. Data yang digunakan pada penelitian ini yaitu data primer dan data sekunder. Data primer merupakan jenis data yang dikumpulkan secara langsung dari sumber oleh peneliti. Koordinat sumber emisi adalah salah satunya data primer yang didapatkan dengan memantau secara langsung posisi cerobong PT X. Koordinat tersebut digunakan untuk memasukkan posisi cerobong dalam menjalankan pemodelan di bahasa pemrograman Python. Selain itu, terdapat data primer lain yang dibutuhkan adalah posisi stasiun pemantau kualitas udara di sekitar PT X. Posisi tersebut akan dibutuhkan ketika diperhitungkan kesesuaian kuantitas emisi ketika arah sebaran hasil pemodelan tepat melewati stasiun tersebut. Kedua data primer tersebut diambil pada waktu awal penelitian. Akan tetapi, seluruh koordinat yang dibutuhkan disesuaikan dengan hasil uji dari perusahaan.

Data sekunder merupakan data eksisting berupa dokumen, referensi, dan laporan rutin harian yang dikumpulkan pada bagian administrasi dari perusahaan. Data sekunder dibutuhkan karena akan digunakan dalam perhitungan pemodelan dispersi. Pengambilan data dilakukan tidak secara langsung karena hanya berupa dokumen inventaris yang dimiliki perusahaan yang sewaktu-waktu dapat dikirimkan. Untuk penjelasan data sekunder apa saja yang dibutuhkan, berikut merupakan rincian datanya:

1. Data meteorologi yang meliputi kecepatan angin, data arah angin, dan data suhu udara ambien selama 1 tahun pengujian.
2. Data kontur *plant* PT X.
3. Data beban emisi dari cerobong PT X selama 1 tahun pengujian.
4. Data kecepatan emisi dari cerobong PT X selama 1 tahun pengujian.
5. Data suhu emisi dari cerobong PT X selama 1 tahun pengujian.
6. Data profil fisik cerobong PT X.
7. Data hasil stasiun pemantau kualitas udara di sekitar PT X selama 1 tahun pengujian.
- 8.

3.5.2 Analisis dan Pembahasan

Pada penelitian ini, untuk menampilkan pemodelan dispersi pencemar SO_2 , NO_x , dan Hg yaitu menggunakan metode Gauss. Dalam menggunakan metode tersebut ada berbagai macam tahapan-tahapan dalam menganalisis penelitian ini.

1. Analisis Data Beban Emisi dan Karakteristik Cuaca

Baku mutu emisi SO_2 , NO_x , dan Hg di Indonesia dihitung melalui perhitungan beban emisi masing-masing pencemar yang mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. 15 Tahun 2019 tentang baku mutu emisi pembangkit listrik tenaga termal. Pengukuran dan perhitungan beban emisi SO_2 , NO_x , dan Hg dari sumber industri merupakan hal yang penting untuk dilakukan karena pencemar tersebut memiliki dampak negatif bagi kesehatan makhluk hidup. Berdasarkan peraturan tersebut, pengukuran dan perhitungan dilakukan saat volume gas keadaan standar (25°C dan tekanan 1 atmosfer) serta dikoreksi dengan O_2 sebesar 7% untuk bahan bakar batu bara. Selain itu, pengukuran dan perhitungan dipengaruhi oleh keadaan cuaca. Akan tetapi, data beban emisi masing-masing pencemar telah dilakukan

pengujian oleh pihak ketiga perusahaan. Dengan demikian, peneliti hanya menggunakan data tersebut saja untuk dimasukkan ke perhitungan.

Pendataan data primer dan data sekunder dilakukan analisis pada bagian ini. Data primer berupa koordinat sumber emisi menentukan titik awal pola sebaran di masing-masing cerobong PT X. Kemudian, data sekunder dapat menentukan stabilitas atmosfer yang juga berhubungan langsung dengan cuaca. Hal tersebut dikarenakan cuaca sekitar PT X mempengaruhi kualitas udara dalam penyebaran emisinya. Kemudian, jika data cuaca berupa arah dan kecepatan angin pada data sekunder kurang lengkap ditambahkan dari situs BMKG online. Data BMKG online berperan penting dalam penentuan musim serta arah angin dominan di sekitar perusahaan.

Prediksi sebaran dilakukan dengan mengasumsi 2 musim yaitu musim hujan dan musim kemarau dengan menggunakan data sekunder selama 1 tahun pengujian. Asumsi diawali dengan melakukan rata-rata curah hujan Stasiun Geofisika Pasuruan. Setelah itu, dilakukan penyesuaian dengan data sekunder yang didapatkan menghasilkan rata-rata keseluruhan data sekunder selama 1 tahun seperti beban emisi, kecepatan angin, arah angin, suhu, kecepatan gas keluar cerobong, dan stabilitas atmosfer. Rata-rata tersebut disimpulkan telah mewakili 2 musim pada model yang ditentukan. Dengan demikian, didapatkan 2 model sebaran emisi pada hasil penelitian ini berdasarkan musim hujan dan musim kemarau.

2. Perhitungan Model

Perhitungan dispersi pencemar pada penelitian ini dilakukan dengan model dispersi Gauss. Model dispersi Gauss merupakan bentuk persamaan matematika yang dapat dimasukkan ke dalam perhitungan variabel yang bersifat fisis dan memberikan informasi yang lebih detail mengenai sumber polutan pada suatu daerah yang diteliti (Puspitasari, 2011). Penyebaran emisi gas dapat menyebabkan pengenceran pencemar di atmosfer. Dengan mengetahui konsentrasi dan pola sebaran beban emisi, maka sebaran pencemar dapat diprediksi guna memantau dan mengevaluasi emisi yang berbahaya di udara ambien.

Perhitungan model dilakukan untuk beberapa nilai faktor penyebaran emisi. Perhitungan manual dikhususkan untuk nilai *plume rise* yang cenderung sama di setiap cerobong serta musim yang berbeda. Untuk perhitungan lainnya hanya sebagai gambaran perhitungan yang dilakukan dalam menentukan konsentrasi emisi di titik reseptor. Berikut merupakan perhitungan yang dilakukan pada penelitian:

1. Konversi satuan beban emisi.
2. Penentuan jarak titik penerima dari sumber emisi.
3. Perhitungan parameter dispersi.
4. Perhitungan *buoyancy flux*.
5. Perhitungan kecepatan angin di ujung cerobong.
6. Perhitungan *plume rise*.
7. Perhitungan nilai konsentrasi di titik penerima.

3. Pembuatan Model Dispersi Menggunakan Python

Pembuatan model pada penelitian ini meliputi penentuan konsentrasi polutan di beberapa titik. Perhitungan konsentrasi di beberapa titik penerima didasarkan oleh tingkat emisi yang dihasilkan oleh setiap cerobong. Selanjutnya, nilai konsentrasi pada titik penerima yang sama diakumulasikan dari sumber cerobong yang berbeda. Memakai bahasa pemrograman Python, perhitungan memunculkan hasil secara otomatis

hanya dengan menginput data hasil analisis serta nilai yang dihitung secara manual. Berikut adalah tahapan mengenai pembuatan model dispersi:

- a. Pendataan beban dan jenis emisi yang berasal dari cerobong yang telah diketahui lebar diameter, dan laju lepasan emisinya setelah merata-ratanya.
- b. Menghitung pengaruh meteorologi terhadap proses dispersi pencemar di atmosfer. Proses dispersi dipengaruhi oleh keadaan keawanan, arah dan kecepatan angin, serta suhu lingkungan melalui data BMKG dan data sekunder.
- c. Penentuan nilai *plume rise* dari data sekunder yang didapatkan untuk mencari tinggi efektif.
- d. Penentuan stabilitas atmosfer ditentukan berdasarkan tabel kriteria *stability class* menurut Pasquill-Gifford. Penentuan kriteria dalam tabel tersebut didasarkan pada kecepatan angin dan radiasi sinar matahari atau tutupan awan.
- e. Memodelkan dispersi dengan data primer serta data sekunder yang terkumpul serta terolah menggunakan rumus (2.1) pada bahasa pemrograman Python.
- f. Mengunduh hasil *running* bahasa pemrograman Python dalam bentuk format excel yang akan dijadikan dasar pembuatan grafik sebaran dan kontur dispersi.

4. Analisis Prediksi Sebaran Emisi pada Wilayah PT X

Banyaknya emisi yang dikeluarkan secara tetap dari cerobong asap (Q) akan terbawa angin dalam arah horizontal (x). Polutan yang tidak bereaksi, massa polutan yang terkandung dalam setiap volume dan setiap jarak akan sama harganya. Akan tetapi, kadarnya akan berkurang dengan bertambahnya jarak dikarenakan turbulensi atmosfer cenderung menyebarkan material ke arah horizontal dan vertikal. Kadar rata-rata polutan pada suatu titik berbanding terbalik terhadap lebar sebaran dan kecepatan angin. Dalam sistem koordinat tiga dimensi terdapat cerobong pada titik pusat, dengan jarak jatuhnya asap dinyatakan oleh x, melebarnya asap dinyatakan oleh y, dan tinggi semburan asap dinyatakan oleh z. Selain itu, berdasarkan ruang lingkup yang ditentukan hasil pola sebaran penelitian ini hanya untuk emisi dalam bentuk gas menggunakan rumus perhitungan (2.1). Hasil akhir bagian ini adalah grafik sebaran. Ada beberapa grafik sebaran dari hasil pemodelan untuk setiap cerobong, emisi, serta di setiap musimnya. Sumbu X dalam grafik mewakili jarak reseptor ke sumber emisi (cerobong), untuk sumbu Y mewakili nilai konsentrasi emisinya. Dari grafik yang terbentuk dapat diketahui pada jarak berapa meter titik penerima emisi dengan konsentrasi tinggi di setiap parameter dan musim yang berbeda.

5. Pembuatan Kontur Dispersi

Kontur dispersi dapat dibuat setelah diketahui konsentrasi polutan di berbagai titik. Kontur dispersi ini memberikan gambaran informasi mengenai nilai konsentrasi pada area penelitian melalui garis kontur yang saling terhubung pada area yang memiliki nilai konsentrasi yang sama. Pembuatan kontur dispersi dibantu dengan aplikasi Surfer 22. Selanjutnya, data Surfer dapat di-*export* ke format aplikasi *Google Earth* (kml). Garis kontur yang merepresentasikan besaran nilai konsentrasi tertentu diberi identitas berupa warna untuk memberikan menunjukkan perbedaan dengan jelas.

6. Validasi dan Verifikasi Model

Validasi model yaitu membandingkan hasil *running* pemrograman Python dengan perhitungan manual. Hal tersebut bertujuan untuk menguji kesamaan antara kedua nilai. Validasi dilakukan dengan mencari nilai *error* dengan membagikan selisih perhitungan manual dan model dengan perhitungan manual. Selanjutnya, verifikasi model dengan

hasil uji ambien dilakukan untuk membandingkan ketepatan hasil model dengan data sekunder yang ada. Verifikasi model dimulai dengan mendata koordinat stasiun pemantau ambien yang ada di PT X. Selanjutnya, koordinat tersebut dapat diketahui nilai konsentrasi emisinya melalui salah satu fungsi dari Bahasa pemrograman Python.

3.6 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan saran dibuat berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah diperoleh. Tahap ini merupakan bagian akhir dari penelitian, yang membahas kesimpulan dari hasil yang diperoleh serta usulan atau rekomendasi untuk implementasi lebih lanjut dan bagi penelitian selanjutnya. Kesimpulan dari penelitian berupa pola sebaran yang terbentuk dengan jarak penerima emisi dengan sumbernya. Kemudian, didapatkan nilai konsentrasi maksimum akumulasi sebaran emisi di wilayah sekitar PT X dengan status baku mutu yang dipersyaratkan. Saran penelitian berupa masukan pengembangan penelitian terkait serta beberapa hal yang dapat ditindak lanjuti oleh PT X dari hasil model.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Sumber Emisi

PT X mengeluarkan emisi melalui cerobong yang bersumber dari kegiatan industri pembangkit berbahan bakar batu bara. Dua cerobong yang dimiliki PT X memiliki karakteristik fisik yang sama. Karakteristik fisik cerobong berpengaruh pada sebaran emisi yang akan dilakukan. Berikut merupakan profil fisik kedua cerobong PT X pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Karakteristik Fisik Cerobong PT X

No	Cerobong	Koordinat		Fisik Cerobong		
		Lattitude	Longitude	Panjang Cerobong (m)	Diameter Cerobong (m)	Posisi Lubang Sampling (m)
1	1	07° 42' 52,5"	113° 35' 08,2"	200	6	120
2	2	07° 42' 51,2"	113° 35' 07,7"	200	6	120

Sumber: Dokumen Hasil Uji Cerobong PT X, 2021



Gambar 4.1 Tampak Atas Cerobong PT X

4.2 Hasil Pengujian Beban Emisi

Beban emisi dari dua cerobong PT X dapat didapatkan dari data *Continuous Emission Monitoring System* (CEMS). CEMS merupakan sistem pemantauan emisi dari cerobong yang datanya dapat dipantau setiap jeda 10 menit. CEMS biasanya digunakan sebagai konsumsi perusahaan sendiri dalam melakukan pemantauan. Akan tetapi, penelitian ini menggunakan informasi terdokumentasi yang didapatkan dari hasil uji yang dilakukan oleh pihak ketiga perusahaan. Hasil pengujian dari pihak ketiga diperoleh hasil uji cerobong bulan Maret, Mei, Agustus, dan Oktober tahun 2021. Berikut merupakan data hasil uji cerobong PT X pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Uji Emisi Cerobong PT X

No	Waktu Pengujian (2021)	Stack	Konsentrasi Terukur (mg/Nm ³)			Temperatur Gas Cerobong (°C)	Kecepatan Alir Gas/ Velocity (m/detik)	Laju Alir Gas (m ³ /detik)
			Sulfur Dioksida, SO ₂	Nitrogen Oksida, NO _x	Merkuri, Hg			
1	Maret	1	55	355	<0,0001	151,7	-	448
2		2	70	360	<0,0001	160,9	-	450
3	Mei	1	231	376	<0,0001	116	-	467
4		2	227	280	<0,0001	162	-	441
5	Agustus	1	334	330	<0,0001	138	-	447
6		2	384	217	<0,0001	147	-	439
7	Oktober	1	522	330	<0,0001	136	25,9	452,1
8		2	336	201	<0,0001	146	26,3	445

Sumber: Dokumen Hasil Uji Cerobong PT X, 2021

Baku mutu emisi pembangkit berbahan baku batu bara diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019. Baku mutu mengacu pada keberadaan pembangkit yang sudah berdiri sebelum peraturan tersebut berlaku. Disimpulkan bahwa emisi yang dikeluarkan oleh kedua cerobong tidak melebihi baku mutu. Sulfur dioksida, nitrogen oksida, dan merkuri memiliki nilai batas masing-masing 550, 500, dan 0,03 dalam satuan mg/Nm³.

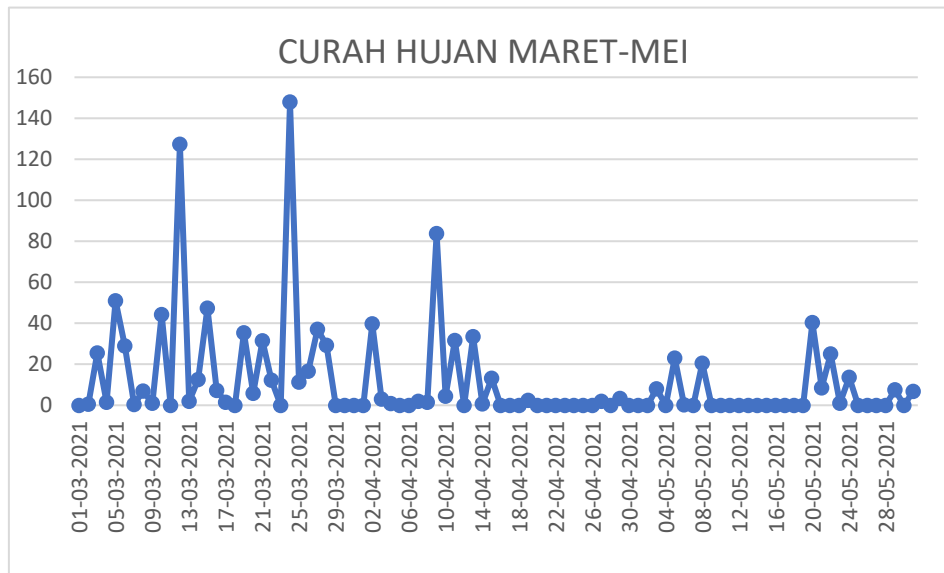
4.3 Analisis Data Meteorologi

Data meteorologi merupakan data yang penting dalam pemodelan ini. Arah dan kecepatan angin sebagai salah satu data meteorologi akan mempengaruhi tinggi rendahnya *plume rise* setelah meninggalkan cerobong dan jauhnya emisi saat menyebar. Selain kedua data tersebut, kelas kestabilan atmosfer setempat akan mempengaruhi pola sebaran emisi. Kelas kestabilan atmosfer diketahui dari besarnya laju turun suhu atmosfer terhadap ketinggian atau kombinasi dari kecepatan angin dengan intensitas sinar matahari (Cahyana, 2012).

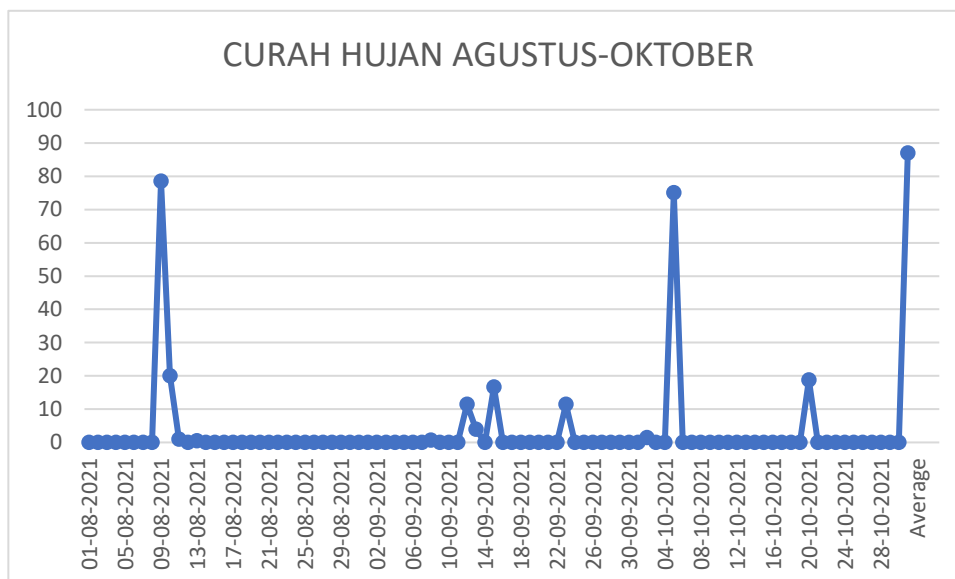
Data meteorologi yang digunakan dalam pemodelan ini didapatkan dari situs online Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). BMKG menyediakan secara lengkap melalui website dataonline.bmkg.go.id yang dapat dengan mudah diakses oleh masyarakat. Data meteorologi yang digunakan berasal dari stasiun pemantau terdekat dari pembangkit yaitu Stasiun Geofisika Pasuruan. Pemodelan akan dibuat menjadi peta sebaran berdasarkan musim hujan dan kemarau. Hasil sebaran akan berbeda dikarenakan faktor perbedaan suhu dan stabilitas atmosfer. Kemudian, data yang diolah merupakan data meteorologi disesuaikan dengan tahun hasil pengujian yaitu tahun 2021. Data disesuaikan dengan waktu hasil uji cerobong dan pemantauan ambien agar hasil pemodelan dapat mendekati kebenarannya.

4.3.1 Penentuan Musim

Pemodelan dibutuhkan pengelompokan musim yang disesuaikan dengan hasil uji cerobong. Hasil uji cerobong dilakukan pada bulan Maret, Mei, Agustus, dan Oktober. Dengan demikian, digunakan data stasiun antara bulan Maret-Mei dan Agustus-Oktober. Selain itu, penentuan musim dilakukan dengan membandingkan curah hujan bulan Maret-Mei dan Agustus-Oktober terkait bulan apakah yang dominan memiliki curah hujan tinggi dan stabil. Didapatkan bahwa bulan Maret-Mei memiliki curah hujan di setiap harinya, sedangkan tidak untuk bulan Agustus-Oktober. Dengan demikian, pada penelitian ini diasumsikan bahwa hasil stasiun bulan Maret-Mei mewakili musim hujan, sedangkan bulan Agustus-Oktober mewakili musim kemarau. Berikut merupakan data curah hujan dari Stasiun Geofisika Pasuruan tahun 2021 pada Gambar 4.2 untuk bulan Maret-Mei dan Gambar 4.3 untuk bulan Agustus-Oktober



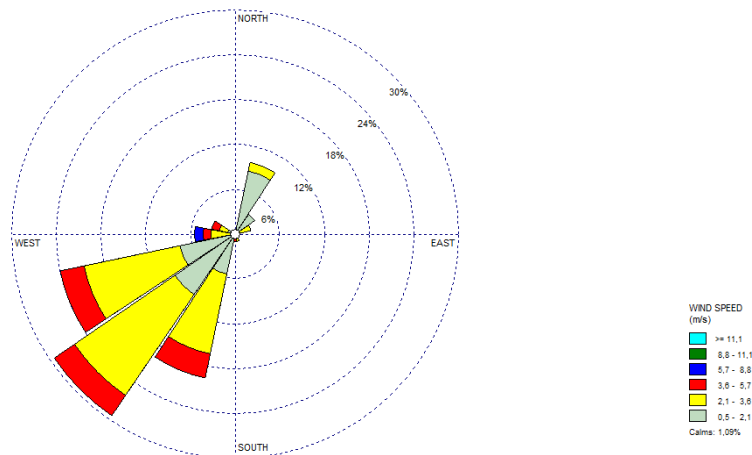
Gambar 4.2 Data Curah Hujan Maret-Mei 2021 Stasiun Geofisika Pasuruan
 Sumber: <http://dataonline.bmkg.go.id/>



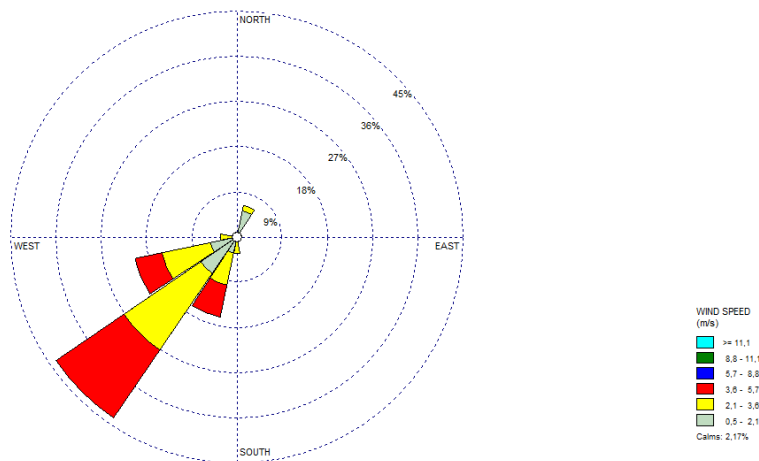
Gambar 4.3 Data Curah Hujan Agustus-Oktober 2021 Stasiun Geofisika Pasuruan
 Sumber: <http://dataonline.bmkg.go.id/>

4.3.2 Arah dan Kecepatan Angin

Angin merupakan faktor yang mempengaruhi penyebaran emisi. Arah angin akan menentukan ke arah mana emisi cerobong akan menyebar, sedangkan kecepatan angin ikut menentukan sampai sejauh mana emisi dapat disebarkan. Perubahan kedua nilai tersebut menunjukkan arah penyebaran dan fluktuasi zat pencemar di atmosfer (Handriyono, 2017). Data angin Stasiun Geofisika Pasuruan digunakan arahnya saja mengingat keterbatasan data dari pantauan ambien di perusahaan. Perbedaan arah dan kecepatan angin dianalisis dalam bentuk *windrose* menggunakan software WRPlot View. Dari *windrose* pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 yang dihasilkan disimpulkan bahwa di kedua musim rata-rata angin berhembus ke arah barat daya.



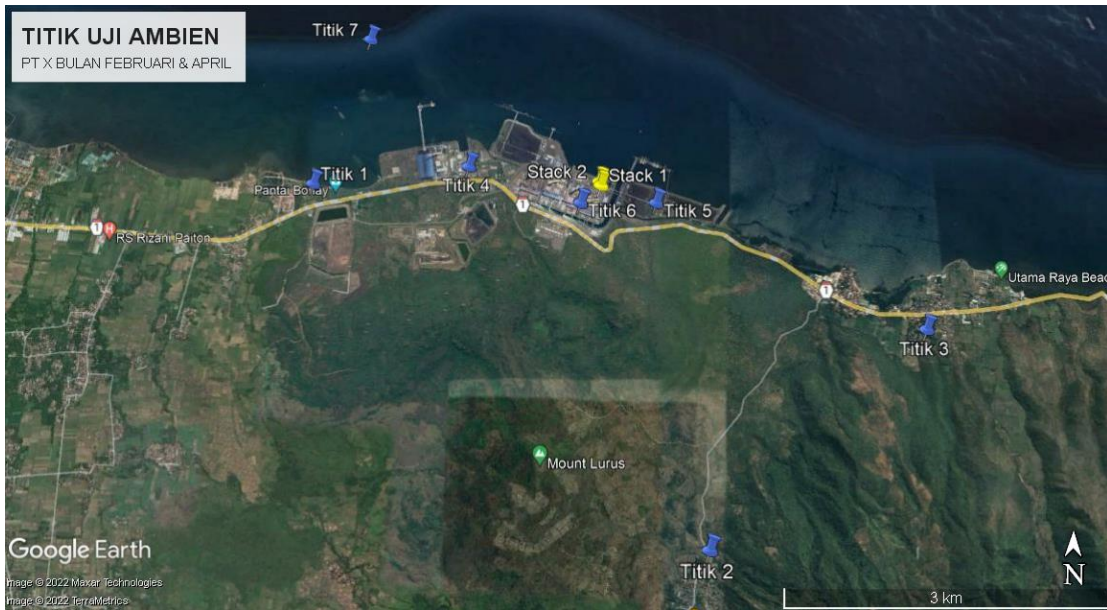
Gambar 4.4 *Windrose* Stasiun Geofisika Pasuruan (Maret-Mei 2021)



Gambar 4.5 *Windrose* Stasiun Geofisika Pasuruan (Agustus-Oktober 2021)

4.4 Analisis Data Hasil Uji Ambien PT X

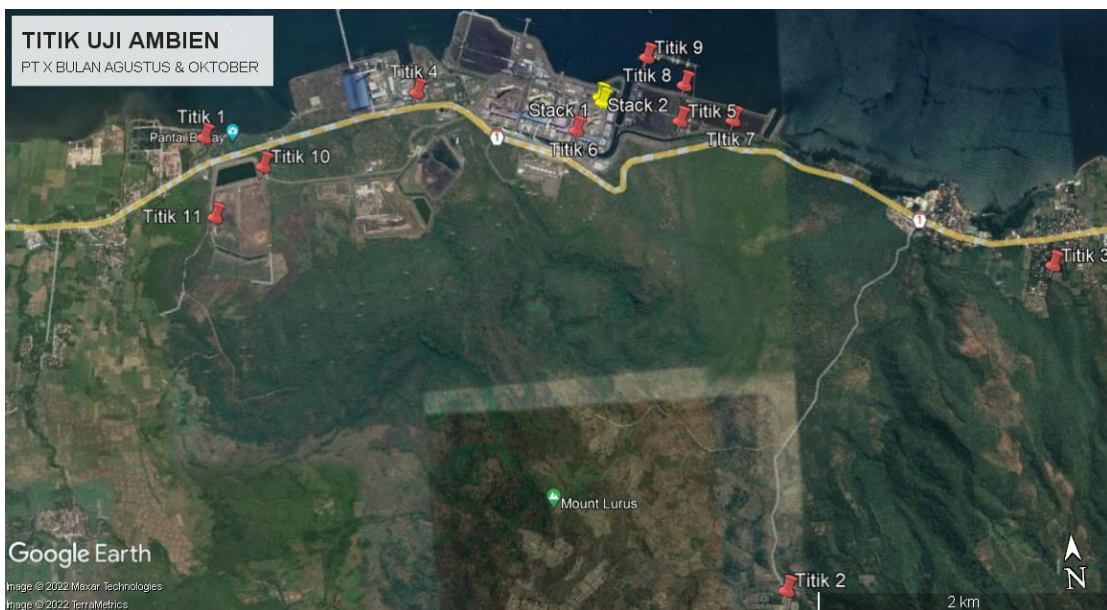
PT X memiliki beberapa titik di sekitar area perusahaan untuk dilakukan pemantauan. Pengujian di beberapa titik pemantauan dilakukan oleh pihak ketiga perusahaan dengan menguji beberapa parameter pencemar lingkungan yang dibutuhkan. Data hasil uji ambien didapatkan hasil pengujian bulan Februari, April, Agustus, dan Oktober tahun 2021. Pengujian pada bulan Februari dan April memiliki kesamaan jumlah titik pemantauan. Di bulan Agustus dan Oktober, terdapat 4 titik pemantau tambahan dari bulan sebelumnya. Selain dari segi penambahan titik, terdapat juga perbedaan penulisan nama titik pantauan. Menanggapi perbedaan tersebut dapat dikoreksi dengan melihat koordinat pada hasil uji dan pemantauan langsung di *site*.



Gambar 4.6 Tampak Atas Letak Stasiun Uji PT X (Februari dan April)

Keterangan:

- Titik 1 = Area Guest House
- Titik 2 = Area Selobanteng
- Titik 3 = Area Pompa Banyuglugur
- Titik 4 = Area Eks Metrologi
- Titik 5 = Area Stock Pile
- Titik 6 = Area Power Plant
- Titik 7 = Area Ash Disposal



Gambar 4.7 Tampak Atas Letak Stasiun Uji PT X (Agustus dan Oktober)

Keterangan:

- Titik 1 = Area Guest House
- Titik 2 = Area Selobanteng
- Titik 3 = Area Pompa Banyuglugur
- Titik 4 = Area Eks Metrologi
- Titik 5 = Area Down Wind Coal Pile
- Titik 6 = Area Power Plant
- Titik 7 = Area PLTMB
- Titik 8 = Area Up Wind Coal Pile
- Titik 9 = Area Jetty (Pelabuhan Bongkar Muat)
- Titik 10 = Area Up Wind Ash Disposal
- Titik 11 = Area Down Wind Ash Disposal

Ada beberapa parameter yang diuji nilainya dengan metode pengukuran masing-masing. Akan tetapi, hanya ada beberapa yang digunakan disesuaikan dengan kebutuhan pemodelan ini. Parameter tersebut antara lain sulfur dioksida, nitrogen dioksida, suhu udara, arah angin, kecepatan angin, cuaca, serta kelembaban udara. Parameter merkuri pada hasil uji ambien tidak dilakukan pengujian. Hal tersebut dikarenakan parameter merkuri belum masuk ke dalam baku mutu ambien yang dipersyaratkan di Indonesia. Dengan demikian, analisis korelasi hanya dilakukan untuk beban emisi sulfur dioksida dan nitrogen dioksida. Berikut merupakan rangkuman data hasil uji beberapa stasiun pemantau di sekitar PT X.

Tabel 4.3 Data Uji Stasiun Pemantau Area Guest House

No	Parameter	Hasil Pengujian			
		Februari 2021	April 2021	Agustus 2021	Oktober 2021
1	Sulfur Dioksida, SO ₂ , µg/Nm ³	<30	32	<30	<30
2	Nitrogen Dioksida, NO ₂ , µg/Nm ³	16,7	34,8	26,6	24,8
3	Merkuri, Hg, µg/Nm ³	-	-	-	-
4	Suhu Udara, °C	27,9	30	29,1	30,8
5	Arah Angin	Ke Barat	Ke Utara	Ke Timur	Ke Selatan
6	Kecepatan Angin, m/detik	0,8-3,2	0,1-1,3	0,5-2,4	0,6-1,8
7	Cuaca	Cerah	Cerah	Cerah	Cerah
8	Tekanan udara, mmHg	759,3	755,4	756,9	756,5
9	Kelembaban Udara, %	73,2	65,7	67,5	66,2

Sumber: Dokumen Hasil Uji Stasiun Pemantau PT X, 2021

Tabel 4.4 Data Uji Stasiun Pemantau Desa Selobanteng

No	Parameter	Hasil Pengujian			
		Februari 2021	April 2021	Agustus 2021	Oktober 2021
1	Sulfur Dioksida, SO ₂ , µg/Nm ³	<30	<30	<30	<30
2	Nitrogen Dioksida, NO ₂ , µg/Nm ³	14,2	35,6	24,2	21
3	Merkuri, Hg, µg/Nm ³	-	-	-	-
4	Suhu Udara, °C	26,6	29,6	29,1	30,6
5	Arah Angin	Ke Barat	Ke Timur	Ke Timur	Ke Timur
6	Kecepatan Angin, m/detik	0,7-2,6	0,3-2,1	0,4-2,5	0,5-1,5
7	Cuaca	Cerah	Cerah	Cerah	Cerah
8	Tekanan udara, mmHg	743,1	755,5	755,5	755,7
9	Kelembaban Udara, %	75	62,2	63,4	67,1

Sumber: Dokumen Hasil Uji Stasiun Pemantau PT X, 2021

Tabel 4.5 Data Uji Stasiun Pemantau Area Pompa Banyuglugur

No	Parameter	Hasil Pengujian			
		Februari 2021	April 2021	Agustus 2021	Oktober 2021
1	Sulfur Dioksida, SO ₂ , µg/Nm ³	<30	35	<30	<30
2	Nitrogen Dioksida, NO ₂ , µg/Nm ³	11,1	39,3	23,8	22
3	Merkuri, Hg, µg/Nm ³	-	-	-	-
4	Suhu Udara, °C	28,9	29,2	29,1	30,3
5	Arah Angin	Ke Barat	Ke Utara	Ke Timur	Ke Selatan
6	Kecepatan Angin, m/detik	0,4-1,7	0,5-2,2	0,5-2,4	0,5-1,5
7	Cuaca	Cerah	Cerah	Cerah	Cerah
8	Tekanan udara, mmHg	757,2	757,1	756,9	756
9	Kelembaban Udara, %	69,9	66	67,5	67,6

Sumber: Dokumen Hasil Uji Stasiun Pemantau PT X, 2021

Tabel 4.6 Data Uji Stasiun Pemantau Eks Metrologi

No	Parameter	Hasil Pengujian			
		Februari 2021	April 2021	Agustus 2021	Oktober 2021
1	Sulfur Dioksida, SO ₂ , µg/Nm ³	<30	<30	<30	<30
2	Nitrogen Dioksida, NO ₂ , µg/Nm ³	33,1	32,7	26,8	25,7
3	Merkuri, Hg, µg/Nm ³	-	-	-	-
4	Suhu Udara, °C	27,7	30,3	29,4	30,7

5	Arah Angin	Ke Barat	Ke Utara	Ke Timur	Ke Selatan
6	Kecepatan Angin, m/detik	0,6-2,9	0,1-1,5	0,4-2,5	0,4-2,1
7	Cuaca	Cerah	Cerah	Cerah	Cerah
8	Tekanan udara, mmHg	757,2	755,4	755,8	756,4
9	Kelembaban Udara, %	75,5	64,9	67	66,2

Sumber: Dokumen Hasil Uji Stasiun Pemantau PT X, 2021

Tabel 4.7 Data Uji Stasiun Pemantau Area Stock Pile/ Down Wind Coal Pile

No	Parameter	Hasil Pengujian			
		Februari 2021	April 2021	Agustus 2021	Oktober 2021
1	Sulfur Dioksida, SO ₂ , μg/Nm ³	<30	38	<30	<30
2	Nitrogen Dioksida, NO ₂ , μg/Nm ³	21,6	41	17,1	22,6
3	Merkuri, Hg, μg/Nm ³	-	-	-	-
4	Suhu Udara, °C	28,1	28,1	29,5	30
5	Arah Angin	Ke Barat	Ke Utara	Ke Timur	Ke Timur
6	Kecepatan Angin, m/detik	0,6-2,5	0,4-2,7	0,4-2,8	0,4-4,4
7	Cuaca	Cerah	Cerah	Cerah	Cerah
8	Tekanan udara, mmHg	759	757,2	755,7	756,4
9	Kelembaban Udara, %	71	74,8	67	70,5

Sumber: Dokumen Hasil Uji Stasiun Pemantau PT X, 2021

Tabel 4.8 Data Uji Stasiun Pemantau Power Plant

No	Parameter	Hasil Pengujian			
		Februari 2021	April 2021	Agustus 2021	Oktober 2021
1	Sulfur Dioksida, SO ₂ , μg/Nm ³	<30	35	<30	40
2	Nitrogen Dioksida, NO ₂ , μg/Nm ³	30,1	39	25,4	27,6
3	Merkuri, Hg, μg/Nm ³	-	-	-	-
4	Suhu Udara, °C	27,9	29,2	29,2	30,7
5	Arah Angin	Ke Barat	Ke Selatan	Ke Timur	Ke Timur
6	Kecepatan Angin, m/detik	0,8-2,6	0,5-2,2	0,5-2,7	0,5-1,8
7	Cuaca	Cerah	Cerah	Cerah	Cerah
8	Tekanan udara, mmHg	758,9	756,6	756,7	756,2
9	Kelembaban Udara, %	72,8	73,1	64,8	63

Sumber: Dokumen Hasil Uji Stasiun Pemantau PT X, 2021

Tabel 4.9 Data Uji Stasiun Pemantau Area Ash Disposal

No	Parameter	Hasil Pengujian			
		Februari 2021	April 2021	Agustus 2021	Oktober 2021
1	Sulfur Dioksida, SO ₂ , µg/Nm ³	<30	32	-	-
2	Nitrogen Dioksida, NO ₂ , µg/Nm ³	20,8	37,1	-	-
3	Merkuri, Hg, µg/Nm ³	-	-	-	-
4	Suhu Udara, °C	28,9	28,9	-	-
5	Arah Angin	Ke Barat	Ke Utara	-	-
6	Kecepatan Angin, m/detik	0,7-3,0	0,6-2,1	-	-
7	Cuaca	Cerah	Cerah	-	-
8	Tekanan udara, mmHg	754,3	756,3	-	-
9	Kelembaban Udara, %	73,3	70,1	-	-

Sumber: Dokumen Hasil Uji Stasiun Pemantau PT X, 2021

Tabel 4.10 Data Uji Stasiun Pemantau PLTMB

No	Parameter	Hasil Pengujian			
		Februari 2021	April 2021	Agustus 2021	Oktober 2021
1	Sulfur Dioksida, SO ₂ , µg/Nm ³	-	-	<30	30
2	Nitrogen Dioksida, NO ₂ , µg/Nm ³	-	-	19	25,7
3	Merkuri, Hg, µg/Nm ³	-	-	-	-
4	Suhu Udara, °C	-	-	29,7	31,3
5	Arah Angin	-	-	Ke Timur	Ke Timur
6	Kecepatan Angin, m/detik	-	-	0,4-2,7	1,0-1,9
7	Cuaca	-	-	Cerah	Cerah
8	Tekanan udara, mmHg	-	-	755,9	756,7
9	Kelembaban Udara, %	-	-	67,4	63,9

Sumber: Dokumen Hasil Uji Stasiun Pemantau PT X, 2021

Tabel 4.11 Data Uji Stasiun Pemantau Up Wind Coal Pile

No	Parameter	Hasil Pengujian			
		Februari 2021	April 2021	Agustus 2021	Oktober 2021
1	Sulfur Dioksida, SO ₂ , µg/Nm ³	-	-	<30	34
2	Nitrogen Dioksida, NO ₂ , µg/Nm ³	-	-	18,7	26,4
3	Merkuri, Hg, µg/Nm ³	-	-	-	-
4	Suhu Udara, °C	-	-	29,5	31,2

5	Arah Angin	-	-	Ke Timur	Ke Timur
6	Kecepatan Angin, m/detik	-	-	0,7-2,8	0,5-3,6
7	Cuaca	-	-	Cerah	Cerah
8	Tekanan udara, mmHg	-	-	756,4	756,8
9	Kelembaban Udara, %	-	-	67,7	63,5

Sumber: Dokumen Hasil Uji Stasiun Pemantau PT X, 2021

Tabel 4.12 Data Uji Stasiun Pemantau Jetty (Pelabuhan Bongkar Muat)

No	Parameter	Hasil Pengujian			
		Februari 2021	April 2021	Agustus 2021	Oktober 2021
1	Sulfur Dioksida, SO ₂ , µg/Nm ³	-	-	<30	36
2	Nitrogen Dioksida, NO ₂ , µg/Nm ³	-	-	27,9	26,5
3	Merkuri, Hg, µg/Nm ³	-	-	-	-
4	Suhu Udara, °C	-	-	29,4	32,1
5	Arah Angin	-	-	Ke Timur	Ke Timur
6	Kecepatan Angin, m/detik	-	-	0,7-3,8	1,1-4,6
7	Cuaca	-	-	Cerah	Cerah
8	Tekanan udara, mmHg	-	-	756,2	757
9	Kelembaban Udara, %	-	-	67	62,8

Sumber: Dokumen Hasil Uji Stasiun Pemantau PT X, 2021

Tabel 4.13 Data Uji Stasiun Pemantau Up Wind Ash Disposal

No	Parameter	Hasil Pengujian			
		Februari 2021	April 2021	Agustus 2021	Oktober 2021
1	Sulfur Dioksida, SO ₂ , µg/Nm ³	-	-	<30	<30
2	Nitrogen Dioksida, NO ₂ , µg/Nm ³	-	-	24	25,2
3	Merkuri, Hg, µg/Nm ³	-	-	-	-
4	Suhu Udara, °C	-	-	29,8	30,9
5	Arah Angin	-	-	Ke Timur	Ke Barat
6	Kecepatan Angin, m/detik	-	-	0,6-2,7	0,7-3,4
7	Cuaca	-	-	Cerah	Cerah
8	Tekanan udara, mmHg	-	-	756,6	756,1
9	Kelembaban Udara, %	-	-	69,1	65,6

Sumber: Dokumen Hasil Uji Stasiun Pemantau PT X, 2021

Tabel 4.14 Data Uji Stasiun Pemantau Down Wind Ash Disposal

No	Parameter	Hasil Pengujian			
		Februari 2021	April 2021	Agustus 2021	Oktober 2021
1	Sulfur Dioksida, SO ₂ , µg/Nm ³	-	-	<30	<30
2	Nitrogen Dioksida, NO ₂ , µg/Nm ³	-	-	20,4	23,9
3	Merkuri, Hg, µg/Nm ³	-	-	-	-
4	Suhu Udara, °C	-	-	29,1	30,6
5	Arah Angin	-	-	Ke Timur	Ke Selatan
6	Kecepatan Angin, m/detik	-	-	0,5-2,9	0,5-2,0
7	Cuaca	-	-	Cerah	Cerah
8	Tekanan udara, mmHg	-	-	756,7	756
9	Kelembaban Udara, %	-	-	70,1	67,1

Sumber: Dokumen Hasil Uji Stasiun Pemantau PT X, 2021

Beberapa parameter di atas selain emisi akan digunakan dalam pemodelan ini. Data suhu udara, kecepatan angin, dan tekanan udara akan digunakan karena menampilkan kondisi yang nyata di area PT X. Hal tersebut dikarenakan data suhu dari BMKG hanya menampilkan kondisi suhu yang berada di area stasiun pasuruan. Selain itu, kecepatan angin nantinya akan ditentukan dengan memakai nilai tengah dari tiap bulan dan merata-rata semuanya, begitupun juga dengan tekanan udara di sekitar PT X. Selanjutnya, parameter arah angin tidak digunakan karena kurang spesifiknya derajat arah angin yang dilampirkan oleh hasil uji stasiun pemantau. Kemudian, data parameter kondisi cuaca dan tingkat kelembaban udara akan membantu dalam menentukan tingkat stabilitas atmosfer. Semakin besar suhu udara semakin kecil tingkat kelembaban udara. Selain itu, jika kelembaban udara kecil maka tingkat kecerahan juga semakin tinggi meningkat kadar air di udara menghilang karena adanya intensitas cahaya matahari (Jannah dan Sudarti, 2021).

4.5 Penentuan Faktor Penyebaran Emisi

4.5.1 Penentuan Karakteristik Emisi Model

Hasil akhir penelitian akan tergambar 2 model penyebaran emisi. Model penyebaran emisi di musim hujan dan kemarau di kedua cerobong yang berbeda. Penentuan beban emisi model diasumsikan dengan merata-rata beban emisi di bulan tertentu pada Tabel 4.2 yang menjadi asumsi musim yang telah dilakukan. Beban emisi musim hujan didapatkan dari merata-rata beban emisi bulan Maret dan Mei, sedangkan beban emisi musim kemarau merupakan rata-rata dari beban emisi bulan Agustus dan Oktober. Selain itu, dilakukan penentuan nilai temperatur gas cerobong dan laju alir gas dengan merata-rata seperti halnya pada penentuan beban emisi. Selanjutnya, nilai kecepatan alir gas pada bulan Oktober diasumsikan telah mewakili tiap musimnya. Hal tersebut dikarenakan keterbatasan data karena tidak dilakukan pengujian di bulan sebelumnya. Berikut merupakan hasil karakteristik emisi yang akan digunakan pada model.

Tabel 4.15 Karakteristik Emisi Model

No	Parameter	Cerobong 1		Cerobong 2	
		Musim Hujan	Musim Kemarau	Musim Hujan	Musim Kemarau
1	Sulfur Dioksida, SO ₂ (mg/Nm ³)	143	428	148,5	360
2	Nitrogen Oksida, NO _x (mg/Nm ³)	365,5	330	320	209
3	Merkuri, Hg (mg/Nm ³)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
4	Temperatur Gas Cerobong (°C)	133,85	137	161,45	146,5
5	Kecepatan Alir Gas/ Velocity (m/detik)	25,9	26,3	25,9	26,3
6	Laju Alir Gas (Nm ³ /detik)	457,5	449,55	445,5	442

Sumber: Data Perhitungan

4.5.2 Penentuan Data Meteorologi Model

Data meteorologi merupakan faktor yang penting dalam pembuatan model dispersi. Data meteorologi penelitian ini didapatkan dari 2 sumber yaitu situs bmgk online dan hasil uji stasiun pemantau di sekitar PT X. Penentuan musim dan arah angin digunakan data dari bmgk online seperti yang telah dijelaskan di bagan 4.3. Sedangkan data dari hasil uji stasiun pemantau, digunakan parameter suhu udara, kecepatan angin, tekanan udara, dan kelembaban udara.

Penggunaan beberapa parameter dari stasiun pemantau karena data yang terekam cukup jelas dan lebih menggambarkan kondisi nyata di sekitar PT X. Beberapa parameter tersebut akan digunakan dalam model dengan merata-rata dengan asumsi musim yang telah ditentukan, serta khusus untuk kecepatan angin diasumsikan nilai tengahnya terlebih dahulu. Berikut merupakan hasil perhitungan setelah merata-rata data stasiun pemantau.

Tabel 4.16 Data Meteorologi Model

No	Parameter	Bulan Uji				Model	
		Februari 2021	April 2021	Agustus 2021	Oktober 2021	Musim Hujan	Musim Kemarau
1	Suhu Udara, °C	28,00	29,33	29,35	30,84	28,66	30,10
2	Kecepatan Angin, m/detik	1,65	1,19	1,63	1,60	1,42	1,62
3	Tekanan Udara, mmHg	755,57	756,21	756,30	756,35	755,89	756,32
4	Kelembaban	72,96	68,11	67,14	65,77	70,54	66,45

4.5.3 Penentuan Stabilitas Atmosfer

Stabilitas atmosfer merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi bentuk model penyebaran emisi. Berdasarkan Tabel 2.2 mengenai Kriteria *stability class* menurut Pasquill-Gifford, penentuan kelas stabilitas dipengaruhi oleh seberapa kuat intensitas cahaya matahari dan kecepatan angin. Kedua parameter tersebut didapatkan dari data hasil uji stasiun pemantau udara setelah merata-ratanya. Hasil akhir penentuan stabilitas atmosfer akan dalam bentuk kelas A hingga F.

Berdasarkan Tabel 4.16, didapatkan rata-rata kecepatan angin dan kelembaban udara masing-masing adalah 1,42 m/detik dan 70,54 % untuk musim hujan serta 1,62 m/detik dan 66,45 %. Kedua kecepatan angin tersebut masuk dalam klasifikasi teratas karena memiliki kecepatan kurang dari 2 m/detik. Kemudian, untuk data kelembaban udara diasumsikan termasuk tingkat sedang/*moderate*. Dengan demikian, kedua model baik musim pengujian maupun musim kemarau dapat digunakan kelas stabilitas A.

4.6 Perhitungan Model

4.6.1 Konversi Satuan Beban Emisi

Beban emisi pada hasil uji pihak ketiga perusahaan terdata dalam satuan mg/Nm^3 . Menurut rumus yang digagaskan oleh Johann Carl Friedrich Gauss, pada rumus 2.1 beban emisi (Q) dibutuhkan dalam satuan g/s dalam mencari konsentrasi (C). Untuk mengkonversi satuan tersebut, dilakukan perubahan satuan mg/Nm^3 ke g/s. Satuan N pada mg/Nm^3 menunjukkan bahwa pengukuran tersebut dilakukan pada suhu normal (25°C , 1 atmosfer). Pengkonversian satuan tersebut dapat langsung dikalikan dengan laju alir gas rata-rata karena laju alir tersebut juga diujikan pada suhu normal berdasarkan Tabel 4.15. Berikut adalah contoh perhitungan konversi satuan beban emisi pada cerobong 1 di musim hujan untuk parameter sulfur dioksida.

Diketahui	
Musim model	: Musim hujan
Sumber	: Cerobong 1
Parameter	: Sulfur Dioksida
Beban emisi	: $143 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
Laju alir gas	: $457,5 \text{ Nm}^3/\text{detik}$
Laju Gas	= Beban emisi x Laju alir gas
	= $143 \text{ mg}/\text{Nm}^3 \times 457,5 \text{ Nm}^3/\text{detik} / 1.000 \text{ g}/\text{mg}$
	= $65,423 \text{ g}/\text{detik}$

Berbeda dengan perhitungan diatas, parameter emisi untuk nitrogen dioksida perlu dispesifikkan. Nitrogen oksida sejatinya merupakan penjumlahan senyawa nitrogen monoksida (NO) dengan nitrogen dioksida (NO_2). Senyawa yang digunakan pada penelitian adalah nitrogen dioksida karena sebagai parameter yang tertulis di lampiran VII PP No 22 Tahun 2021 sebagai baku mutu ambien. Berdasarkan penelitian Rao dan George (2014), kadar NO_2 dalam NO_x dari sumber pembangkit sejumlah 10-20 %, sedangkan untuk NO sejumlah 80-90 %. Penelitian digunakan rentang 20% untuk menspesifikkan senyawa NO_2 . Selain itu, NO yang tersebar dapat berpotensi berubah menjadi NO_2 akibat proses oksidasi di atmosfer. Untuk merkuri, dilakukan konversi

satuan sama dengan parameter sulfur dioksida. Berikut merupakan contoh perhitungan konversi satuan beban emisi pada cerobong 1 di musim hujan untuk parameter nitrogen dioksida.

Diketahui	
Musim model	: Musim hujan
Sumber	: Cerobong 1
Parameter	: Nitrogen Dioksida
Beban emisi NO _x	: 365,5 mg/Nm ³
Laju alir gas	: 457,5 Nm ³ /detik
Berat molekul NO	: 30,01 g/mol
Berat molekul NO ₂	: 46,0055 g/mol
Beban emisi NO ₂	= 20% x Beban emisi NO _x = 20% x 365,5 mg/Nm ³ = 73,1 mg/Nm ³
Beban emisi NO	= 80% x Beban emisi NO _x = 80% x 365,5 mg/Nm ³ = 282,4 mg/Nm ³
NO ke NO ₂	= Beban emisi NO x $\frac{\text{Berat molekul NO}_2}{\text{Berat molekul NO}}$ = 282,4 mg/Nm ³ x $\frac{46,0055 \text{ g/mol}}{30,01 \text{ g/mol}}$ = 448,251 mg/Nm ³
Laju Gas	= (Beban emisi NO ₂ + Potensi NO ke NO ₂) x Laju alir gas = 521,351 mg/Nm ³ x 457,5 Nm ³ /detik / 1.000 g/mg = 238,518 g/detik

Tabel 4.17 Hasil Perhitungan Laju Gas (g/detik) Emisi

No	Parameter	Cerobong 1		Cerobong 2	
		Musim Penghujan	Musim Kemarau	Musim Penghujan	Musim Kemarau
1	Sulfur Dioksida, SO ₂	65,423	192,407	66,157	159,120
2	Nitrogen Dioksida, NO ₂	238,518	211,609	203,348	131,768
3	Merkuri, Hg	0,0000458	0,000045	0,000045	0,000044

Sumber: Data Perhitungan

4.6.2 Penentuan Jarak Titik Penerima dari Sumber Emisi

Penentuan jarak titik penerima dilakukan dengan mengetahui terlebih dahulu titik sumber emisi dari kedua cerobong. Penentuan jarak tersebut sejatinya akan digunakan sebagai input pemodelan untuk parameter *downwind* (X). Nilai *downwind* dapat ditentukan sebarang mungkin karena prinsip sebaran emisi adalah semakin jauh jarak *downwind*, emisi yang menyebar akan semakin kecil. Koordinat kedua cerobong pada pemodelan digunakan satuan UTM dengan nilai x dan y untuk cerobong 1 adalah 785221 dan 9146391 sedangkan untuk cerobong 2 adalah 785206 dan 9146431. Nilai tersebut didapatkan dari konversi angka koordinat pada Tabel 4.1 menggunakan geoplaner.com.

Selanjutnya, penentuan titik penerima dapat ditentukan dengan menentukan batas koordinat UTM di sekitar wilayah penelitian. Selain itu, batas tersebut ditentukan secara bebas serta disesuaikan dengan arah angin dominan penelitian. Batas yang digunakan untuk koordinat x adalah antara 741000 hingga 786000 sedangkan untuk koordinat y adalah 9102000 hingga 9147000. Penggabungan dari koordinat x dan y akan menghasilkan beberapa titik disesuaikan dengan keragaman yang diinginkan.

Setelah itu, keragaman titik penerima ditentukan dengan menggunakan bantuan fungsi *grid* pada bahasa pemrograman Python. Sistem numerik dengan pembagian *grid* yang dapat memuat satu seri iterasi perhitungan dari semua sumber. Secara prinsip semakin banyak *grid* yang digunakan maka hasil perhitungan semakin baik (teliti dan spesifik). Akan tetapi, semakin banyak waktu yang dibutuhkan dalam menganalisis banyaknya *grid* menyebabkan perhitungan semakin tidak efektif. Berdasarkan disertasi Assomadi (2016), penggunaan *grid* 300 merupakan batasan minimal yang cukup dalam menampilkan distribusi emisi. Penggunaan *grid* lebih besar dari 300 tidak banyak memberikan perubahan pola dispersi dengan nyata. Dengan demikian, pada penelitian ini digunakan *grid* 300 sebagai nilai minimal dalam menghitung sebaran emisi.

Secara konsep, emisi akan terhitung ketika jarak *downwind* searah dengan arah mata angin dominan. Pada perhitungan ini akan diasumsikan satu titik penerima yang searah mata angin dari cerobong satu. Ditentukan koordinat UTM x adalah 781873 dan y adalah 9143024. Untuk menentukan jarak titik penerima dilakukan perhitungan menggunakan rumus 2.6 dan 2.7. Berikut merupakan contoh perhitungan menggunakan parameter sulfur dioksida dari cerobong satu di musim hujan.

Diketahui

Musim model : Musim hujan

Sumber : Cerobong 1

Parameter : Sulfur Dioksida

Koordinat vertikal sumber emisi (y_1) : 9146391

Koordinat horizontal sumber emisi (x_1) : 785221

Jangkauan emisi vertical (y_2) : 9143024

Jangkauan emisi horizontal (x_2) : 781873

Derajat arah angin (α) : 225°

$$y' = (y_2 - y_1) \cos \alpha + (x_1 - x_2) \sin \alpha$$

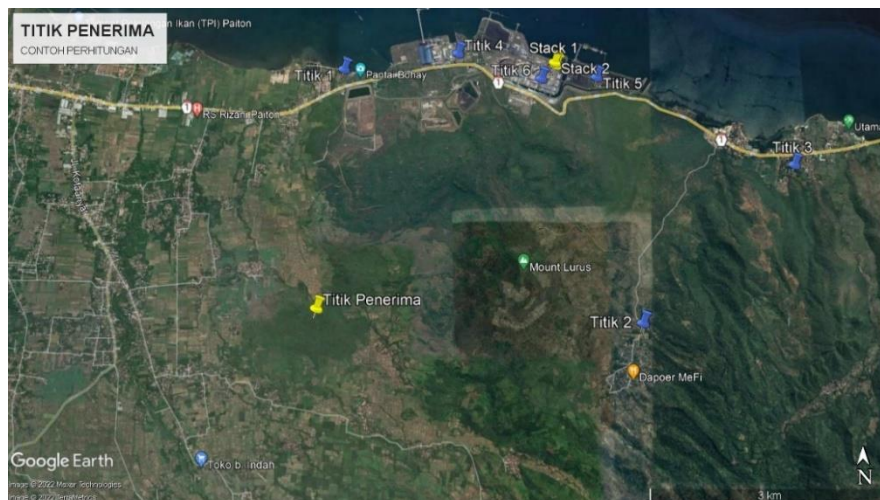
$$= (9143024 - 9146391) \cos 225^\circ + (785221 - 781873) \sin 225^\circ$$

$$= -57,276 \text{ m}$$

$$x' = (x_2 - x_1) \cos \alpha - (y_1 - y_2) \sin \alpha$$

$$= (781873 - 785221) \cos 225^\circ - (9146391 - 9143024) \sin 225^\circ$$

$$= 4.677,511 \text{ m}$$



Gambar 4.8 Tampak Atas Cerobong 1 PT X dan Titik Penerima Terdekat

4.6.3 Perhitungan Parameter Dispersi

Perhitungan parameter dispersi dalam penelitian ini digunakan dari buku *Air Dispersion Modeling* oleh Visscher (2014). Parameter dispersi yang dimaksud adalah nilai dari σ_y dan σ_z . Dengan perusahaan berada di Kawasan perdesaan (rural), digunakan Tabel 2.3 dalam mencari σ_y dan σ_z berdasarkan kelas stabilitas atmosfernya. Berikut merupakan contoh perhitungan parameter dispersi cerobong 1 pada musim hujan dengan jarak *downwind* sekitar 4.677,511 m

Diketahui

Musim model : Musim kemarau

Kelas stabilitas : A

Sumber : Cerobong 1

Jarak *downwind* (X) : 4.677,511 m

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 0,22 \times X \times (1 + 0,0001 \times X)^{-0,5} \\ &= 0,22 \times 4.677,511 \text{ m} \times (1 + 0,0001 \times 4.677,511 \text{ m})^{-0,5} \\ &= 849,398 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_z &= 0,2 \times X \\ &= 0,2 \times 4.677,511 \text{ m} \\ &= 935,502 \text{ m}\end{aligned}$$

4.6.4 Perhitungan Buoyancy Flux

Buoyancy flux merupakan koefisien dari pemuain gas yang disebabkan oleh perbedaan temperatur ketika meninggalkan cerobong. *Buoyancy flux* sangat berpengaruh pada perhitungan tinggi kepulan (*plume rise*). Sebelum menentukan nilai kepulan, akan didapatkan juga nilai *downward distance* dan jarak transisi level kepulan. Berikut adalah contoh perhitungan pada cerobong 1 di musim hujan.

Diketahui

Musim Model : Musim hujan

Sumber : Cerobong 1

Kecepatan emisi saat keluar dari cerobong (ws): 25,9 m/s

Diameter cerobong (ds) : 6 m

Temperatur gas keluar cerobong (Ts) : 133,85 °C + 273

: 406,85 K

Temperatur udara ambien (Ta) : 28,66 °C + 273
: 301,66 K

$$Fb = \frac{g \cdot ws \cdot ds^3 (Ts - Ta)}{4 \cdot Ts}$$

$$= \frac{9,81 \cdot 25,9 \cdot 6^3 (406,85 - 301,66)}{4 \cdot 406,85}$$

$$= 3.547,19 \text{ m}^4/\text{s}^3$$

$$X^* = 34 \cdot Fb^{\frac{2}{5}}$$

$$= 34 \cdot 3.547,19^{\frac{2}{5}}$$

$$= 894,20 \text{ m}$$

$$Xf = 3,5 \cdot X^*$$

$$= 3,5 \cdot 894,20 \text{ m}$$

$$= 3.129,69 \text{ m}$$

4.6.5 Perhitungan Kecepatan Angin di Ujung Cerobong

Kecepatan angin merupakan hal yang dapat mempengaruhi tinggi rendahnya keputan asap atau disebut *plume rise*. Dengan demikian, dibutuhkan nilai kecepatan angin tepat di ujung cerobong. Perhitungan kecepatan angin tersebut dapat menggunakan rumus 2.5. Berikut adalah perhitungan pada musim hujan dan musim kemarau.

1. Diketahui

Musim Model : Musim hujan
Sumber : Cerobong 1 dan Cerobong 2
Kecepatan angin pada ketinggian muka tanah (u1): 1,42 m/s
Ketinggian anemometer (z1) : 10 m
Ketinggian cerobong (z2) : 200 m
Fungsi stabilitas atmosfer (p) : 0,15 (*rural terrain*, kelas stabilitas A)

$$u2 = u1 \left(\frac{z2}{z1} \right)^p$$

$$= 1,42 \left(\frac{200}{10} \right)^{0,15}$$

$$= 2,22 \text{ m/s}$$

2. Diketahui

Musim model : Musim kemarau
Sumber : Cerobong 1 dan Cerobong 2
Kecepatan angin pada ketinggian muka tanah (u1): 1,62 m/s
Ketinggian anemometer (z1) : 10 m
Ketinggian cerobong (z2) : 200 m
Fungsi stabilitas atmosfer (p) : 0,15 (*rural terrain*, kelas stabilitas A)

$$u2 = u1 \left(\frac{z2}{z1} \right)^p$$

$$= 1,42 \left(\frac{200}{10} \right)^{0,15}$$

$$= 2,53 \text{ m/s}$$

4.6.6 Perhitungan *Plume Rise*

Plume rise merupakan tinggi keputan yang dilepaskan oleh cerobong. Tinggi rendahnya *plume rise* mempengaruhi konsentrasi dispersi emisi pada lingkungan sekitar. Biasanya, perhitungan *plume rise* diperlukan perhitungan *Buoyancy Flux* yang merupakan koefisien dari pemuai gas ketika meninggalkan cerobong. Akan tetapi,

pada perhitungan ini akan digunakan persamaan Brigg. Berikut merupakan perhitungan *plume rise* pada cerobong 1 di musim hujan.

Diketahui

Musim Model : Musim hujan

Sumber : Cerobong 1

Kecepatan angin di ujung cerobong (u_2) : 2,2 m/s

Buoyancy flux (F_b) : 3.547,19 m⁴/s³

Downward distance (X^*) : 894,20 m

$$\Delta h = \frac{1,6 F_b^{\frac{1}{3}} X^{*\frac{2}{3}}}{u_2}$$

$$= \frac{1,6 \cdot 3.547,19^{\frac{1}{3}} \cdot 894,20^{\frac{2}{3}}}{2,2}$$

$$= 1.019,18 \text{ m}$$

Berikut merupakan rangkuman perhitungan nilai tinggi efektif cerobong ketika tinggi cerobong telah ditambahkan nilai *plume rise*.

Tabel 4.18 Hasil Perhitungan Tinggi Efektif Cerobong PT X

No	Parameter	Cerobong 1		Cerobong 2	
		Musim Hujan	Musim Kemarau	Musim Hujan	Musim Kemarau
1	<i>Buoyancy Flux</i> , F_b (m ⁴ /s ³)	3547,19	3632,71	4193,48	3865,95
2	<i>Downward Distance</i> , X^* (m)	894,20	902,76	956,11	925,51
3	Jarak Transisi Level Kepulan, X_f (m)	3129,69	3159,65	3346,39	3239,29
4	<i>Plume Rise</i> , Δh (m)	1019,18	907,14	1126,84	1073,18
5	Tinggi Efektif Cerobong, H (m)	1219,18	1107,14	1326,84	1273,18

Sumber: Data Perhitungan

4.6.7 Perhitungan Nilai Konsentrasi di Titik Penerima

Perhitungan konsentrasi sejatinya dapat diketahui ke semua titik menuju titik penerima yang akan muncul secara otomatis melalui bahasa pemrograman Python. Perhitungan konsentrasi emisi berdasarkan persamaan Gauss pada rumus 2.1. Persamaan tersebut masih dalam bentuk sumber tunggal kontinu. Contoh perhitungan dilakukan dengan menggunakan jarak *downwind* sebagai titik penerima. Berikut adalah perhitungan konsentrasi emisi sulfur dioksida pada jarak *downwind* untuk cerobong 1 di musim hujan.

Diketahui

Beban emisi (Q) : 65,423 g/s

Kecepatan Angin di cerobong (u) : 25,9 m/s

Jarak *downwind* (X) : 4.677,511 m

Jarak *crosswind* (y) : -57,276 m

σ_y : 849,398 m

σ_z : 935,502 m

Tinggi elevasi penerima (z_1) : 61 mdpl

Tinggi elevasi sumber emisi (z2) : 6 mdpl
 Tinggi penerima emisi/manusia (z3) : 1,5 mdpl
 Selisih elevasi (z) : (z1-z2-z3)
 : 53,5 m
 Plume rise (Δh) : 1.019,18 m
 Tinggi cerobong (h) : 200 m
 Tinggi efektif ($H = h + \Delta h$) : 1.219,19 m

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{u} \frac{1}{2 \pi \sigma_y \sigma_z} e^{\left(\frac{-y^2}{2 \sigma_y^2}\right)} \left[e^{\left(\frac{-(z-H)^2}{2 \sigma_z^2}\right)} + e^{\left(\frac{-(z+H)^2}{2 \sigma_z^2}\right)} \right]$$

$$= \frac{65,423 \text{ g/s}}{25,9 \text{ m/s}} \frac{1}{2 \pi 849,398 \text{ m } 935,502 \text{ m}} e^{\left(\frac{-57,276 \text{ m}^2}{2 \cdot 935,502 \text{ m}^2}\right)} \left[e^{\left(\frac{-(53,5 \text{ m} + 1.219,19 \text{ m})^2}{2 \cdot 935,502 \text{ m}^2}\right)} + e^{\left(\frac{-(53,5 \text{ m} - 1.219,19 \text{ m})^2}{2 \cdot 935,502 \text{ m}^2}\right)} \right]$$

$$= 0,43413 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$$

$$= 0,43413 \text{ } \mu\text{g/m}^3$$

4.7 Pembuatan Model Dispersi

Pembuatan model digunakan bahasa pemrograman Python untuk mengetahui nilai konsentrasi emisi pada jarak yang beragam. Bahasa pemrograman membuat perhitungan konsentrasi menjadi otomatis hanya dengan menentukan titik reseptor dalam bentuk *grid* berjumlah 300. Selain itu, penggunaan *grid* tersebut dilakukan pembulatan nilai desimal 3 agar variasi koordinat penerima emisi tidak terlalu spesifik. Kemudian, berbagai macam fungsi ditulis secara otomatis untuk mempermudah perhitungan. Selain titik reseptor dalam bentuk *grid*, fungsi otomatis yang ditekan adalah fungsi mengetahui elevasi reseptor emisi melalui api.open-elevation.com. Keberadaan fungsi tersebut dikarenakan setiap elevasi reseptor yang berbeda-beda. Di hasil akhir model akan didapatkan nilai konsentrasi beserta titik koordinat penerima, grafik sebaran emisi, serta kontur dispersinya. Berikut merupakan gambaran bahasa pemrograman Python yang dibuat.

```
print("Dispersi Gaussian single Point Calculation: receptor in ground, z = 1.5")
print("The General Formulation; specific for atmospheric stability: A")
print("C(x,0,0,H,u) = (Q/2.phl.dy.dz.ws)(exp(-y^2/2dy^2))(exp(-((z-H)^2/(2*dz^2))+exp(-((z+H)^2/(2*dz^2))))")
print()

# stb = input("masukkan kekuatan radiasi (strong/moderate/slight): ")
# print()

dir = 225 # nilai arah angin rata-rata (derajat, north = 0)
u = 1.62 # kecepatan angin (m/s)
time = 'day' # stabilitas atmosfer (strong/moderate/slight)
condition = 'strong'

M1 = 1107.14
q1 = 192.407
x1 = 785221
y1 = 9146391
ws1 = 25.9

M2 = 1273.18
q2 = 159.120
x2 = 785206
y2 = 9146431
ws2 = 26.3

# z = 1.5

x, y = np.mgrid[776000:786000:300j, 9138000:9148000:300j]
x = np.round(x, decimals = 3)
y = np.round(y, decimals = 3)

lat, lon = to_latlon(x, y)

Zc = get_elevation(lat, lon)
Z = 6
z = Zc - Z - 1.5
```

Gambar 4.9 Tampilan Bahasa Pemrograman Python

4.8 Analisis Prediksi Sebaran Emisi Pada Wilayah PT X

Perhitungan model Gauss diasumsikan emisi akan jatuh pada ketinggian rata-rata manusia yaitu 1,5 meter dari permukaan tanah. Perbedaan arah angin pada musim kemarau dan hujan mengakibatkan adanya perbedaan wilayah penerima sebaran emisi. Selain itu setiap titik penerima sebaran emisi pada masing-masing wilayah memiliki ketinggian yang berbeda. Hasil *running* model Gauss pada variasi kondisi cuaca musim hujan dan musim kemarau dengan kelas stabilitas atmosfer dan arah angin yang berbeda menghasilkan nilai konsentrasi sebaran emisi yang berbeda di setiap titik penerima.

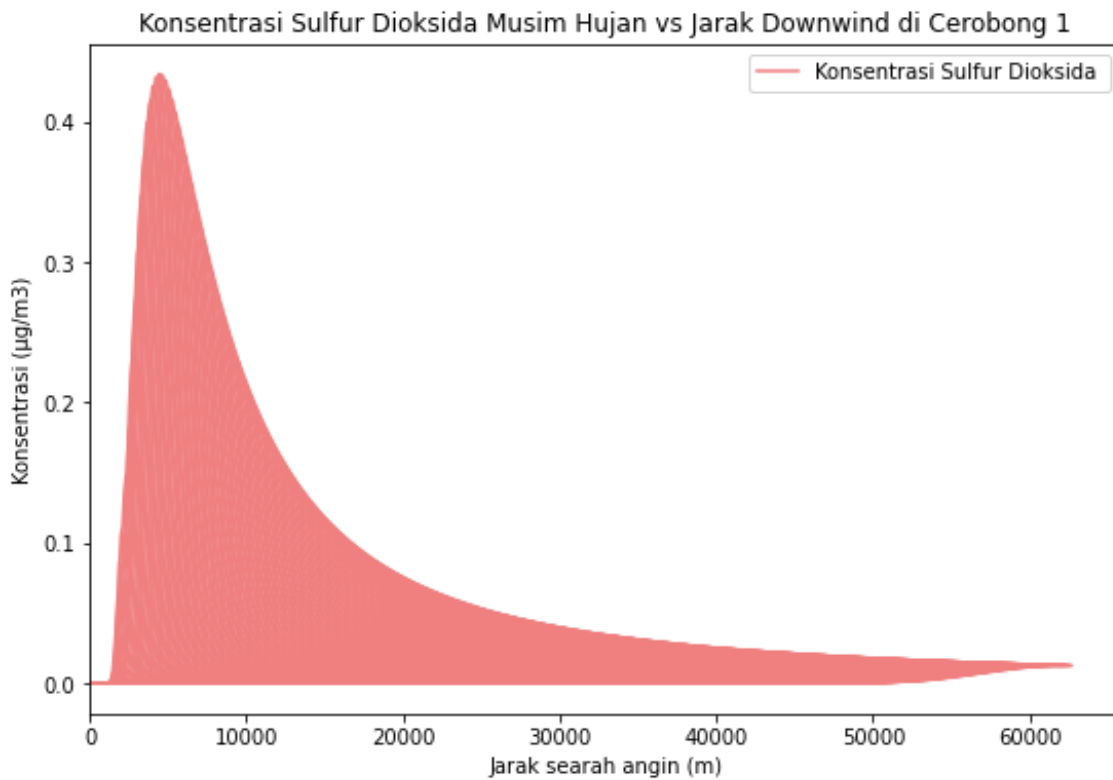
Hasil analisis data meteorologi pada periode musim hujan didapatkan angin bergerak dari timur laut ke menuju barat daya dengan rata-rata kecepatan 1,42 m/s dan suhu lingkungan adalah 28,66 C. Kemudian, hasil analisis meteorologi pada periode musim kemarau didapatkan bahwa angin bergerak juga dari timur laut ke menuju barat daya dengan rata-rata kecepatan 1,62 m/s dan suhu lingkungan adalah 30,10 C. Dengan demikian, titik penerima sebaran emisi di kedua model berada di sebelah barat daya cerobong PT X.

Tinggi cerobong berpengaruh terhadap nilai tinggi efektif cerobong. Semakin tinggi cerobong maka sebaran emisi akan lebih meluas (Nauli, 2002). Dengan karakteristik cerobong yang sama-sama tinggi, tidak ada perbedaan yang cukup signifikan pada model. Selain itu, semakin tinggi suatu tempat maka tekanan udara kebawah akan semakin berkurang serta angin yang bergerak semakin cepat sehingga menyebabkan emisi dapat terdispersi cukup luas.

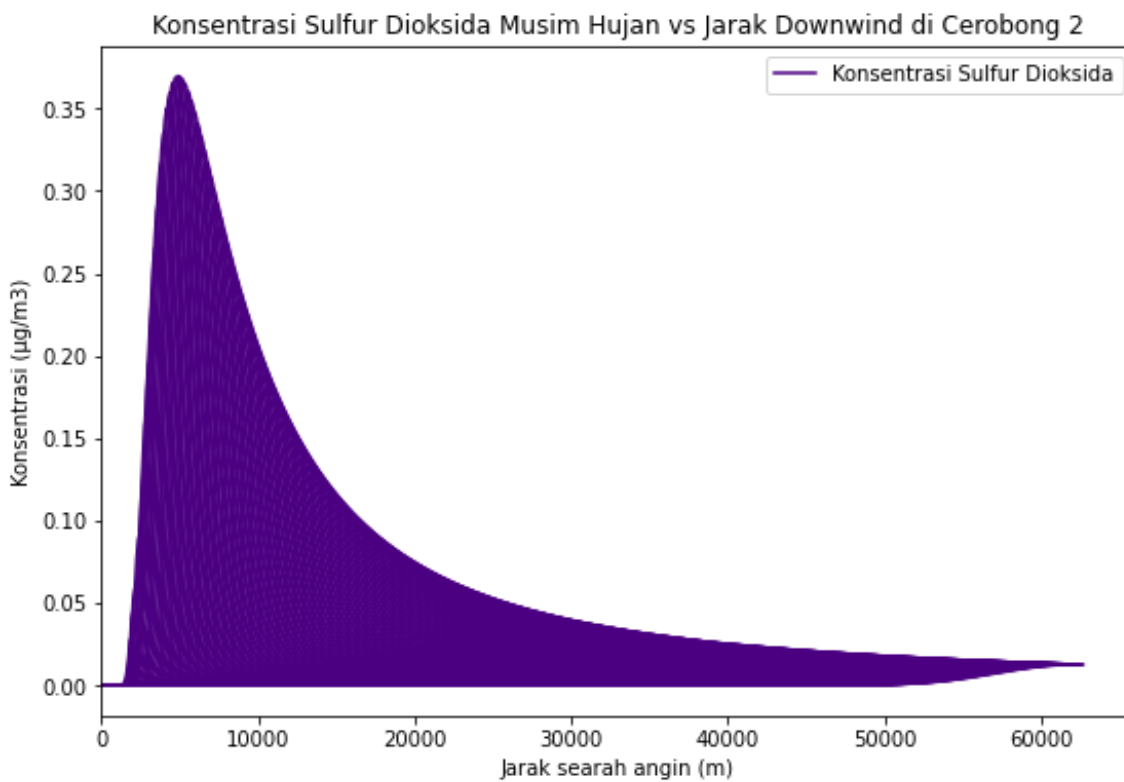
4.8.1 Analisis Sebaran Sulfur Dioksida

Konsentrasi sulfur dioksida yang diemisikan dengan konsentrasi di setiap cerobong masing-masing terjadi pada stabilitas A (stabil) yakni baik pada musim hujan ataupun kemarau. Dengan jarak *downwind* (X) yang sama akan memperlihatkan perbedaan tingkat penyebaran emisi karena disesuaikan beban emisi ataupun data meteorologi lainnya. Jarak yang digunakan pada grafik merupakan jarak *grid* yang diatur pada lingkup area penyebaran emisi. Berdasarkan Gambar 4.10 terlihat bahwa konsentrasi maksimum penyebaran sulfur dioksida pada cerobong 1 di musim hujan adalah $0,434 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dalam jarak 4.445,994 m. Konsentrasi maksimum penyebaran sulfur dioksida pada cerobong 2 di musim hujan adalah $0,370 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Gambar 4.11) dalam jarak 4.889,355 m. Konsentrasi maksimum penyebaran sulfur dioksida pada cerobong 1 di musim kemarau adalah $1,528 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Gambar 4.12) dalam jarak 4.020,311 m. Konsentrasi maksimum penyebaran sulfur dioksida pada cerobong 2 di musim kemarau adalah $0,959 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Gambar 4.13) dalam jarak 4.676,513 m.

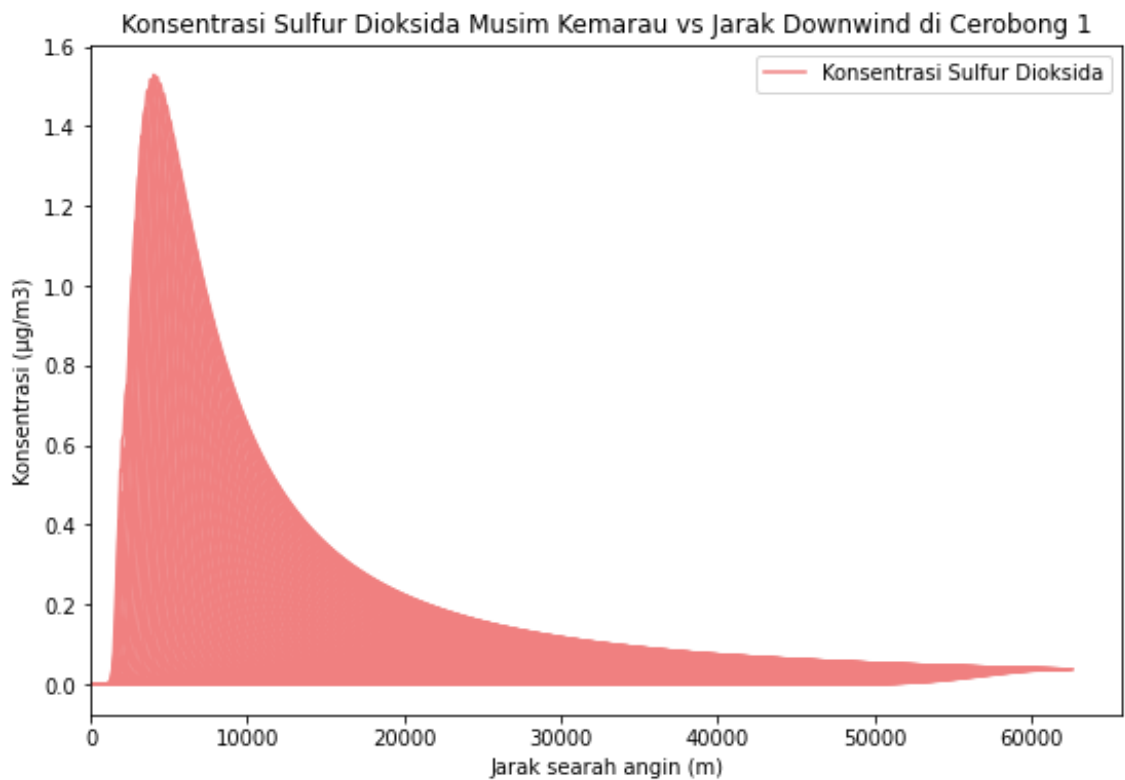
Berdasarkan kesimpulan tersebut didapatkan penyebaran konsentrasi emisi sulfur dioksida di musim kemarau lebih tinggi daripada musim hujan. Laju gas sulfur dioksida pada cerobong 1 dan cerobong 2 di musim hujan masing-masing adalah 65,423 g/s dan 66,157 g/s, sedangkan di musim kemarau masing-masing adalah 192,407 g/s dan 159,12 g/s. Selain tingginya nilai emisi yang tersebar, jarak penerima emisi tertinggi dari sumber juga bervariasi. Hal tersebut dikarenakan adanya faktor meteorologi yang berbeda di setiap cerobong dan di setiap musimnya.



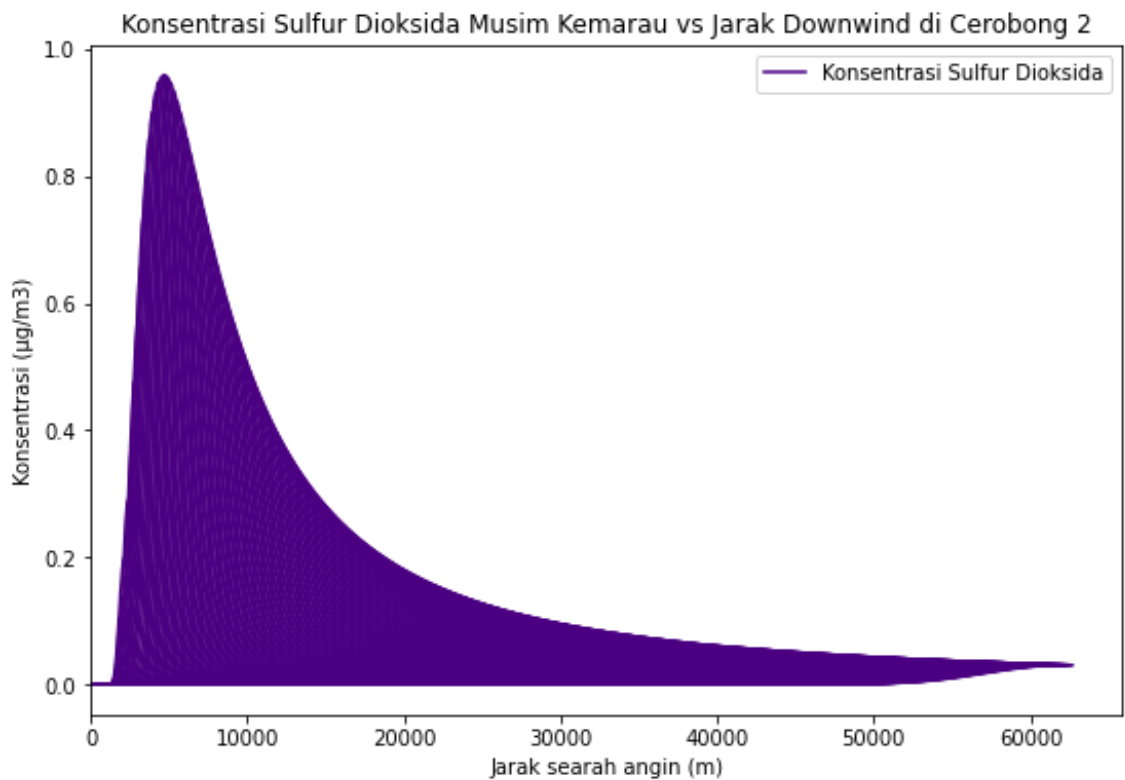
Gambar 4.10 Grafik Sebaran Konsentrasi Sulfur Dioksida pada Cerobong 1 di Musim Hujan



Gambar 4.11 Grafik Sebaran Konsentrasi Sulfur Dioksida pada Cerobong 2 di Musim Hujan



Gambar 4.12 Grafik Sebaran Konsentrasi Sulfur Dioksida pada Cerobong 1 di Musim Kemarau

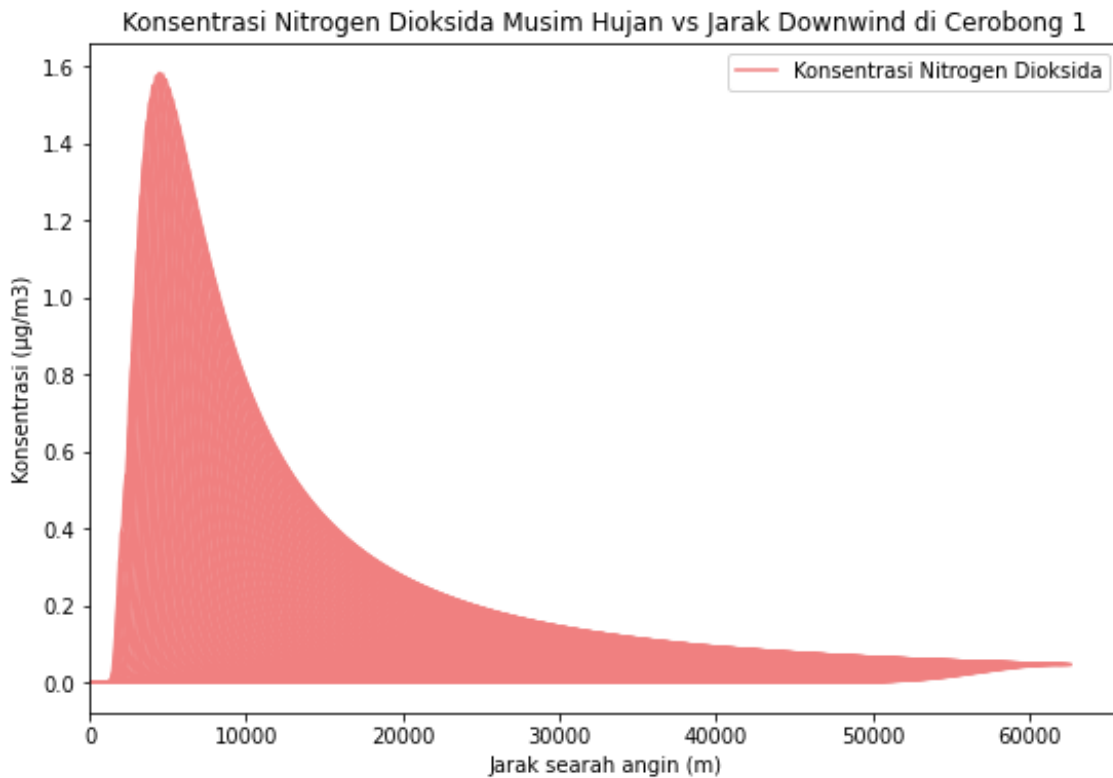


Gambar 4.13 Grafik Sebaran Konsentrasi Sulfur Dioksida pada Cerobong 2 di Musim Kemarau

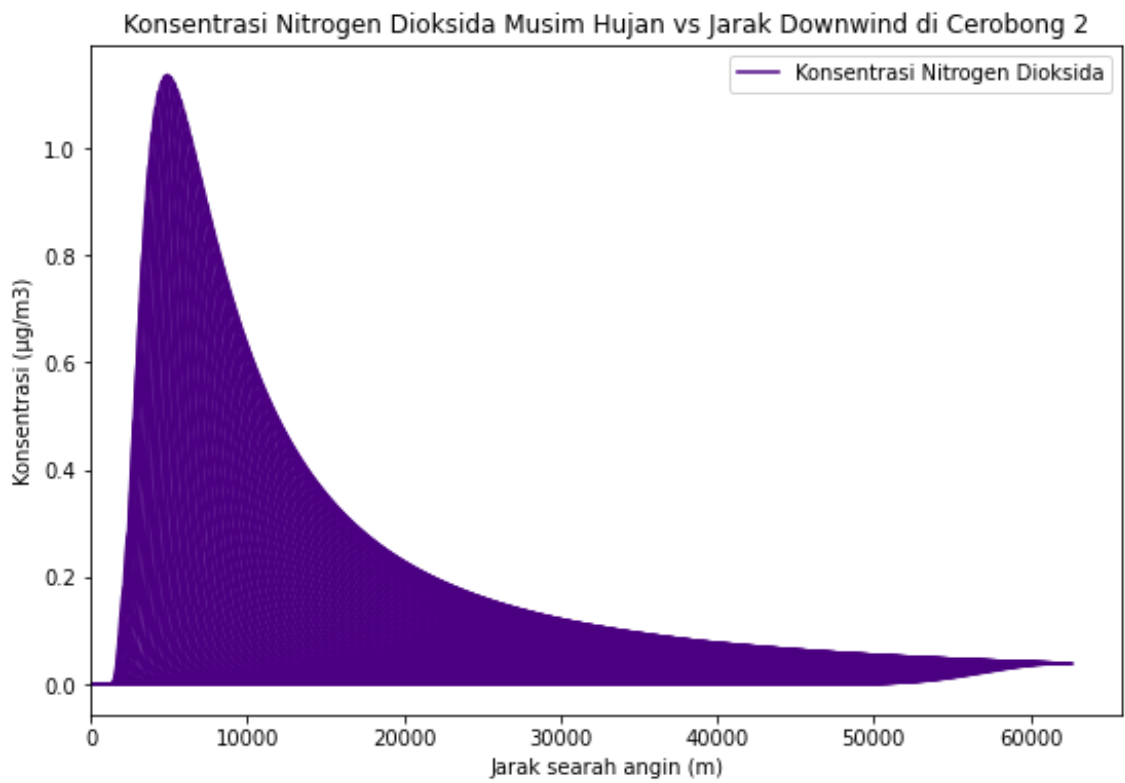
4.8.2 Analisis Sebaran Nitrogen Dioksida

Konsentrasi nitrogen dioksida yang diemisikan dengan konsentrasi di setiap cerobong masing-masing terjadi pada stabilitas A (stabil) yakni baik pada musim hujan ataupun kemarau. Dengan jarak downwind (X) yang sama akan memperlihatkan perbedaan tingkat penyebaran emisi karena disesuaikan beban emisi ataupun data meteorologi lainnya. Jarak yang digunakan pada grafik merupakan jarak *grid* yang diatur pada lingkup area penyebaran emisi. Berdasarkan Gambar 4.14 terlihat bahwa konsentrasi maksimum penyebaran nitrogen dioksida pada cerobong 1 di musim hujan adalah $1,583 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dalam jarak 4.445,994 m. Konsentrasi maksimum penyebaran nitrogen dioksida pada cerobong 2 di musim hujan adalah $1,137 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Gambar 4.15) dalam jarak 4.889,355 m. Konsentrasi maksimum penyebaran nitrogen dioksida pada cerobong 1 di musim kemarau adalah $1,681 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Gambar 4.16) dalam jarak 4.020,311 m. Konsentrasi maksimum penyebaran nitrogen dioksida pada cerobong 2 di musim kemarau adalah $0,794 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Gambar 4.17) dalam jarak 4.676,513 m.

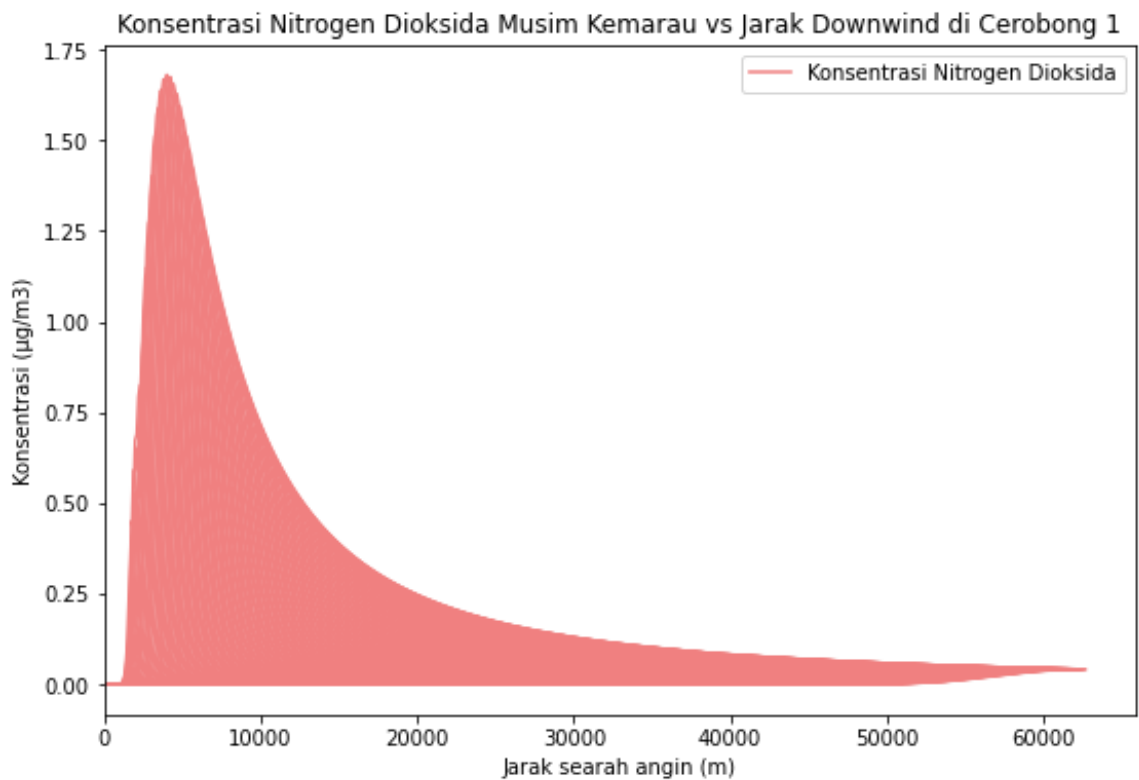
Berdasarkan kesimpulan tersebut didapatkan penyebaran konsentrasi emisi nitrogen dioksida di musim hujan lebih tinggi daripada musim kemarau. Laju gas nitrogen dioksida pada cerobong 1 dan cerobong 2 di musim hujan masing-masing adalah 238,518 g/s dan 203,348 g/s, sedangkan di musim kemarau masing-masing adalah 211,609 g/s dan 131,768 g/s. Selain tingginya nilai emisi yang tersebar, jarak penerima emisi tertinggi dari sumber juga bervariasi. Hal tersebut dikarenakan adanya faktor meteorologi yang berbeda di setiap cerobong dan di setiap musimnya.



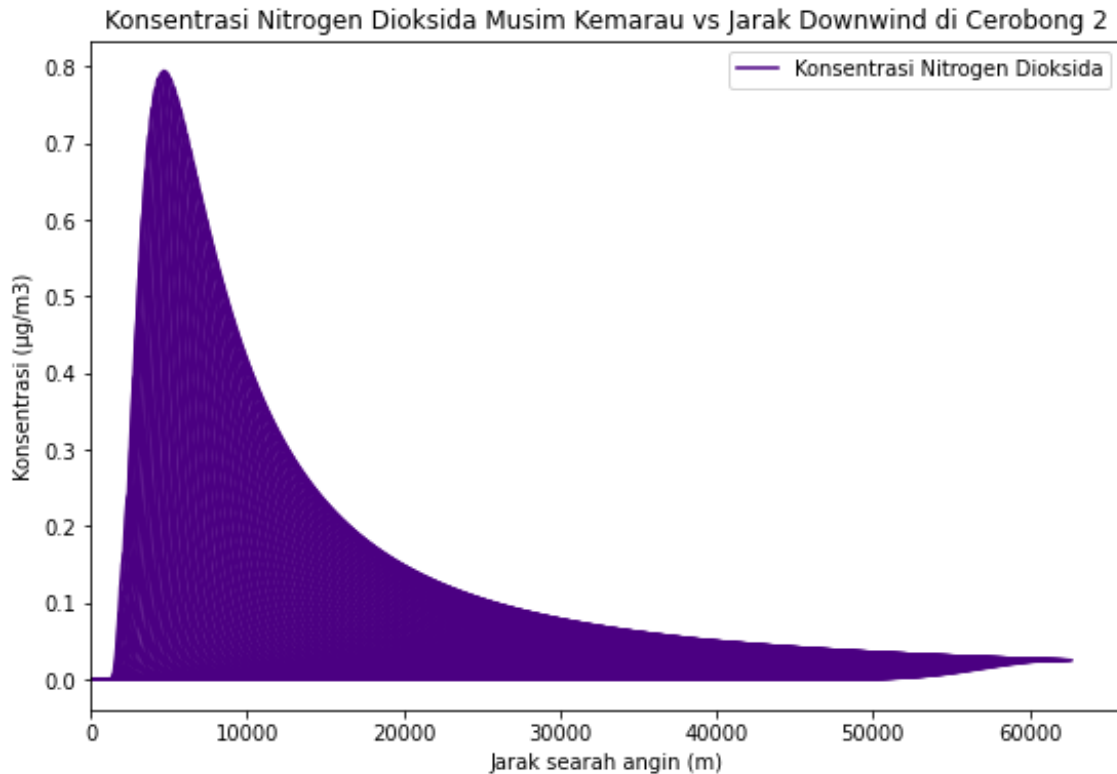
Gambar 4.14 Grafik Sebaran Konsentrasi Nitrogen Dioksida pada Cerobong 1 di Musim Hujan



Gambar 4.15 Grafik Sebaran Konsentrasi Nitrogen Dioksida pada Cerobong 2 di Musim Hujan



Gambar 4.16 Grafik Sebaran Konsentrasi Nitrogen Dioksida pada Cerobong 1 di Musim Kemarau

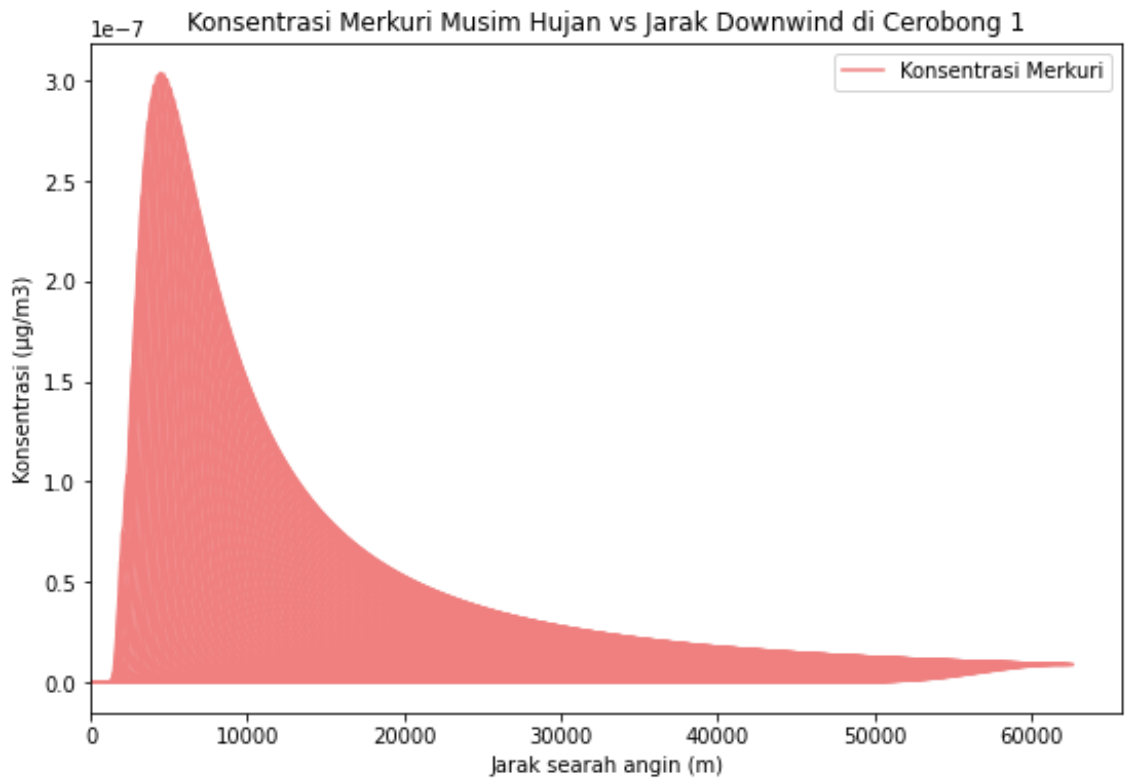


Gambar 4.17 Grafik Sebaran Konsentrasi Nitrogen Dioksida pada Cerobong 2 di Musim Kemarau

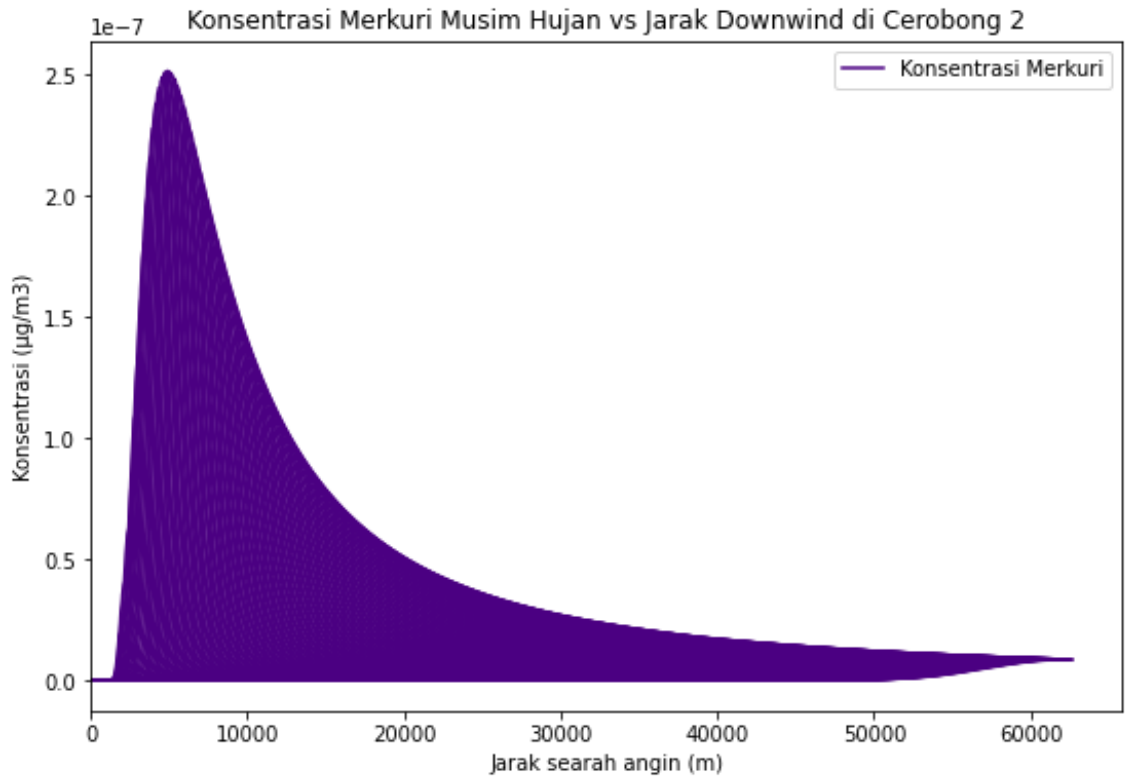
4.8.3 Analisis Sebaran Merkuri

Konsentrasi merkuri yang diemisikan dengan konsentrasi di setiap cerobong masing-masing terjadi pada stabilitas A (stabil) yakni baik pada musim hujan ataupun kemarau. Dengan jarak downwind (X) yang sama akan memperlihatkan perbedaan tingkat penyebaran emisi karena disesuaikan beban emisi ataupun data meteorologi lainnya. Jarak yang digunakan pada grafik merupakan jarak *grid* yang diatur pada lingkup area penyebaran emisi. Berdasarkan Gambar 4.18 terlihat bahwa konsentrasi maksimum penyebaran merkuri pada cerobong 1 di musim hujan adalah $3,04e^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ dalam jarak 4.445,994 m. Konsentrasi maksimum penyebaran merkuri pada cerobong 2 di musim hujan adalah $2,52e^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Gambar 4.19) dalam jarak 4.889,355 m. Konsentrasi maksimum penyebaran merkuri pada cerobong 1 di musim kemarau adalah $3,57e^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Gambar 4.20) dalam jarak 4.020,311 m. Konsentrasi maksimum penyebaran merkuri pada cerobong 2 di musim kemarau adalah $2,65e^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Gambar 4.21) dalam jarak 4.676,513 m

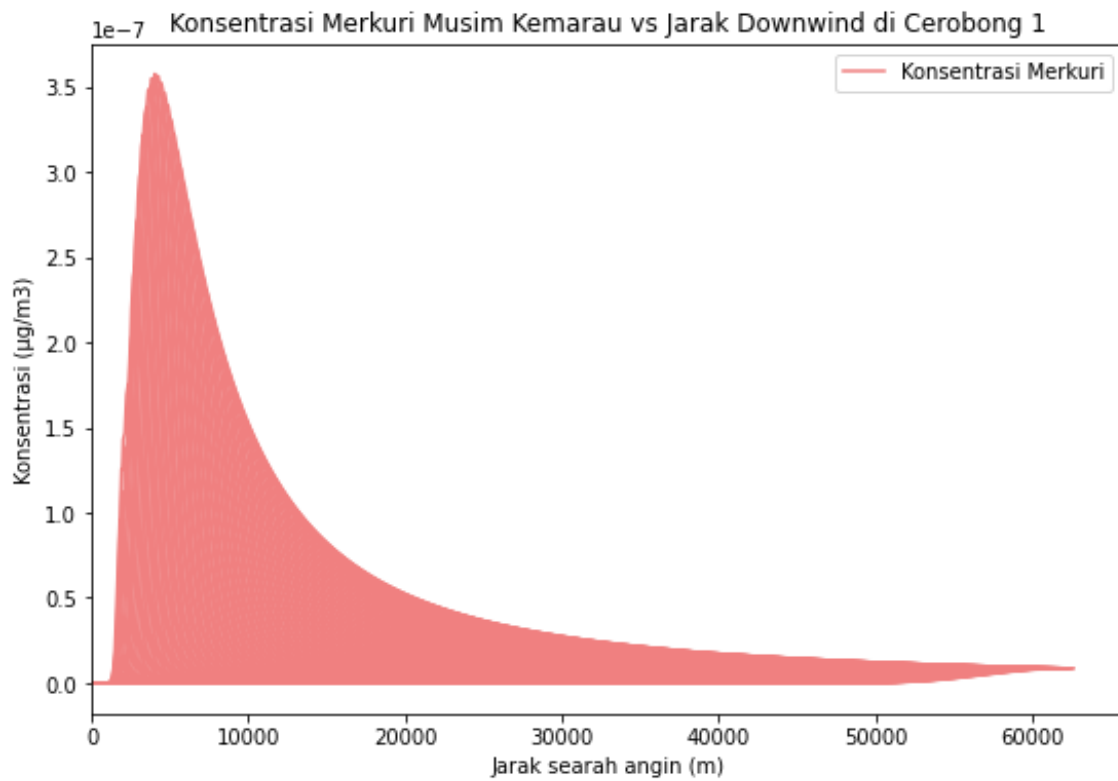
Berdasarkan kesimpulan tersebut didapatkan penyebaran konsentrasi emisi merkuri di musim kemarau lebih tinggi daripada musim hujan. Laju gas merkuri pada cerobong 1 dan cerobong 2 di musim hujan masing-masing adalah 0,0000458 g/s dan 0,0000446 g/s, sedangkan di musim kemarau masing-masing adalah 0,000045 g/s dan 0,0000442 g/s. Selain tingginya nilai emisi yang tersebar, jarak penerima emisi tertinggi dari sumber juga bervariasi. Hal tersebut dikarenakan adanya faktor meteorologi yang berbeda di setiap cerobong dan di setiap musimnya.



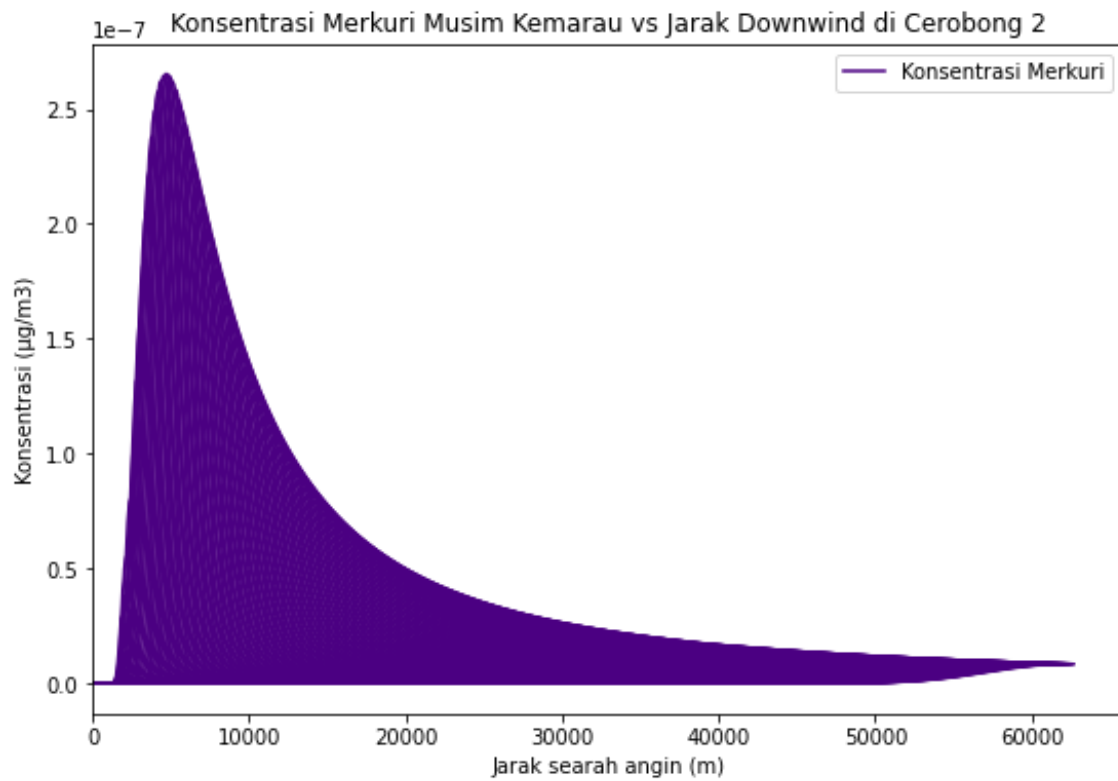
Gambar 4.18 Grafik Sebaran Konsentrasi Merkuri pada Cerobong 1 di Musim Hujan



Gambar 4.19 Grafik Sebaran Konsentrasi Merkuri pada Cerobong 2 di Musim Hujan



Gambar 4.20 Grafik Sebaran Konsentrasi Merkuri pada Cerobong 1 di Musim Kemarau



Gambar 4.21 Grafik Sebaran Konsentrasi Merkuri pada Cerobong 2 di Musim Kemarau

Berdasarkan analisis tersebut, didapatkan kesimpulan bahwa setiap parameter dengan sumber emisi / cerobong yang sama serta dengan musim yang sama memiliki jarak yang sama untuk titik penerima emisi tertinggi dari sumber. Hal tersebut disebabkan karena adanya kesamaan data meteorologi yang spesifik di setiap cerobong dan setiap musimnya, walaupun terdapat perbedaan dengan laju emisi di setiap parameter yang dikeluarkan oleh cerobong. Perbedaan tersebut yang menunjukkan variasi besarnya konsentrasi emisi di titik yang sama. Di musim hujan, titik konsentrasi tertinggi emisi yang berasal dari cerobong 1 berada di titik koordinat (782086,957 m; 9143237,458 m), sedangkan dari cerobong 2 berada di titik koordinat (781785,953 m; 9142936,455 m). Di musim kemarau, titik konsentrasi tertinggi emisi yang berasal dari cerobong 1 berada di titik koordinat (782387,96 m; 9143538,462 m), sedangkan dari cerobong 2 berada di titik koordinat (781936,455 m; 9143086,957 m). Berikut merupakan tampak atas titik sebaran tertinggi di musim hujan dan musim kemarau.



Gambar 4.22 Titik Sebaran Tertinggi Musim Hujan



Gambar 4.23 Titik Sebaran Tertinggi Musim Kemarau

4.9 Pembuatan Kontur Dispersi Emisi

Berdasarkan hasil perhitungan konsentrasi emisi dari masing-masing sumber emisi, dari dua periode waktu model yakni musim hujan dan musim kemarau menghasilkan nilai konsentrasi sebaran emisi di udara ambien yang berbeda pada setiap titik penerima. Hal ini disebabkan oleh faktor meteorologi dan relief area penerima emisi yang berbeda. Kontur dispersi akan dihasilkan berupa pola sebaran emisi dan kontur dispersi hasil akumulasi konsentrasi cerobong 1 dan cerobong 2. Pada pembuatan *overlay* ke dalam *Google Earth* pada penelitian ini digunakan aplikasi Surfer 22. Aplikasi Surfer berfungsi untuk menerjemahkan data *running* Python ke dalam angka geografis agar dapat terlihat secara nyata.

Gambar pola sebaran hasil *running* bahasa pemrograman Python tergambar ke arah barat daya sesuai arah angin yang dominan. Skala konsentrasi pada pola sebaran digambarkan melalui gradasi warna. Konsentrasi rendah hingga tinggi digambarkan dengan warna ungu hingga warna merah. Skala warna digunakan untuk mempermudah pembacaan gambar. Dari pola sebaran tersebut terlihat ada titik temu antara sebaran emisi yang dihasilkan oleh kedua cerobong.

Penggambaran kontur konsentrasi emisi PT X di udara ambien menggunakan *software* Surfer 22. Skala konsentrasi pada gambar kontur digambarkan melalui gradasi warna. Konsentrasi rendah hingga tinggi digambarkan dengan warna transparan hingga warna merah. Skala warna digunakan untuk mempermudah pembacaan gambar. Setiap musim dan jenis emisi menghasilkan gambar kontur konsentrasi yang berbeda sesuai dengan laju gas setiap parameternya. Selain itu, hal ini dikarenakan sebaran emisi yang dipengaruhi oleh faktor meteorologi dan ketinggian dari masing-masing titik penerima.

4.9.1 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida

Penggambaran sebaran emisi sulfur dioksida dinyatakan dalam 2 model yaitu model musim hujan dan model musim kemarau. Penggambaran tersebut dihasilkan pola sebaran emisi sulfur dioksida dari sumber dengan menyesuaikan arah angin yang mempengaruhinya. Melalui pola tersebut, terdapat nilai konsentrasi yang berbeda dari setiap titik penerima emisi. Berikut adalah nilai indeks standar pencemar udara yang telah dikategorikan melalui rentangnya untuk parameter sulfur dioksida dengan standar 24 jam pengukuran.

Tabel 4.19 Kategori Tingkat Pencemaran Udara Parameter Sulfur Dioksida

Kategori	Konsentrasi Emisi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Baik	0 – 80
Sedang	80 – 365
Tidak Sehat	365 – 800
Sangat Tidak Sehat	800 – 1.600
Berbahaya	> 1.600

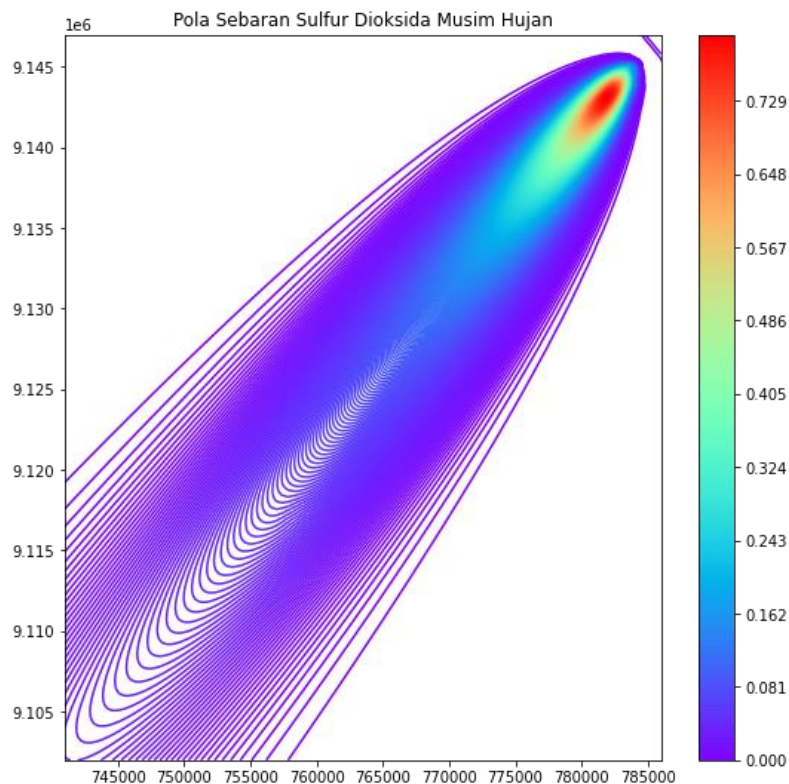
Sumber: Kep. Bapedal No. 107 Tahun 1997

Gambar 4.24 menggambarkan pola sebaran di musim hujan memiliki *scale* konsentrasi emisi tak lebih dari nilai $0,729 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan Gambar 4.25

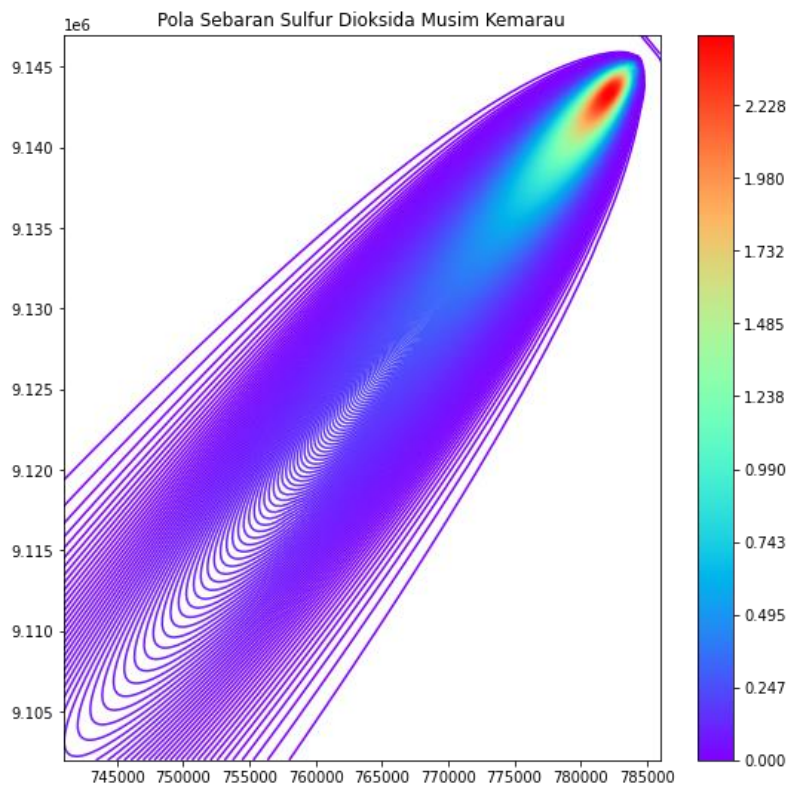
menggambarkan pola sebaran di musim kemarau memiliki *scale* konsentrasi emisi tak lebih dari nilai $2,228 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Berdasarkan Tabel 4.19, 2 pola sebaran yang menggambarkan masuk dalam kategori baik. Pada kategori ini, tidak ada dampak yang ditimbulkan kepada manusia. Akan tetapi, kategori baik memungkinkan terjadinya kerusakan berupa luka pada beberapa spesies tumbuhan jika terdapat senyawa ozon O_3 (selama 4 jam).

Gambar kontur dispersi hasil *overlay* menggambarkan bahwa sebaran emisi jatuh jauh dari area pabrik. Titik penerima emisi didominasi oleh lahan hijau arah barat daya kedua cerobong. Setiap cerobongnya menghasilkan sebaran konsentrasi emisi yang berbeda-beda. Gambar 4.26 merupakan gambaran kontur dispersi sulfur dioksida di musim hujan, sedangkan Gambar 4.27 yaitu gambaran kontur dispersi sulfur dioksida di musim kemarau. Jika diakumulasikan, penyebaran di musim hujan menggambarkan konsentrasi tertinggi pada titik koordinat (781936,455 m; 9143086,957 m) dengan konsentrasi $0,802 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Kemudian, penyebaran di musim kemarau menggambarkan konsentrasi tertinggi pada titik koordinat (782237,458 m; 9143387,96 m) dengan konsentrasi $2,465 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

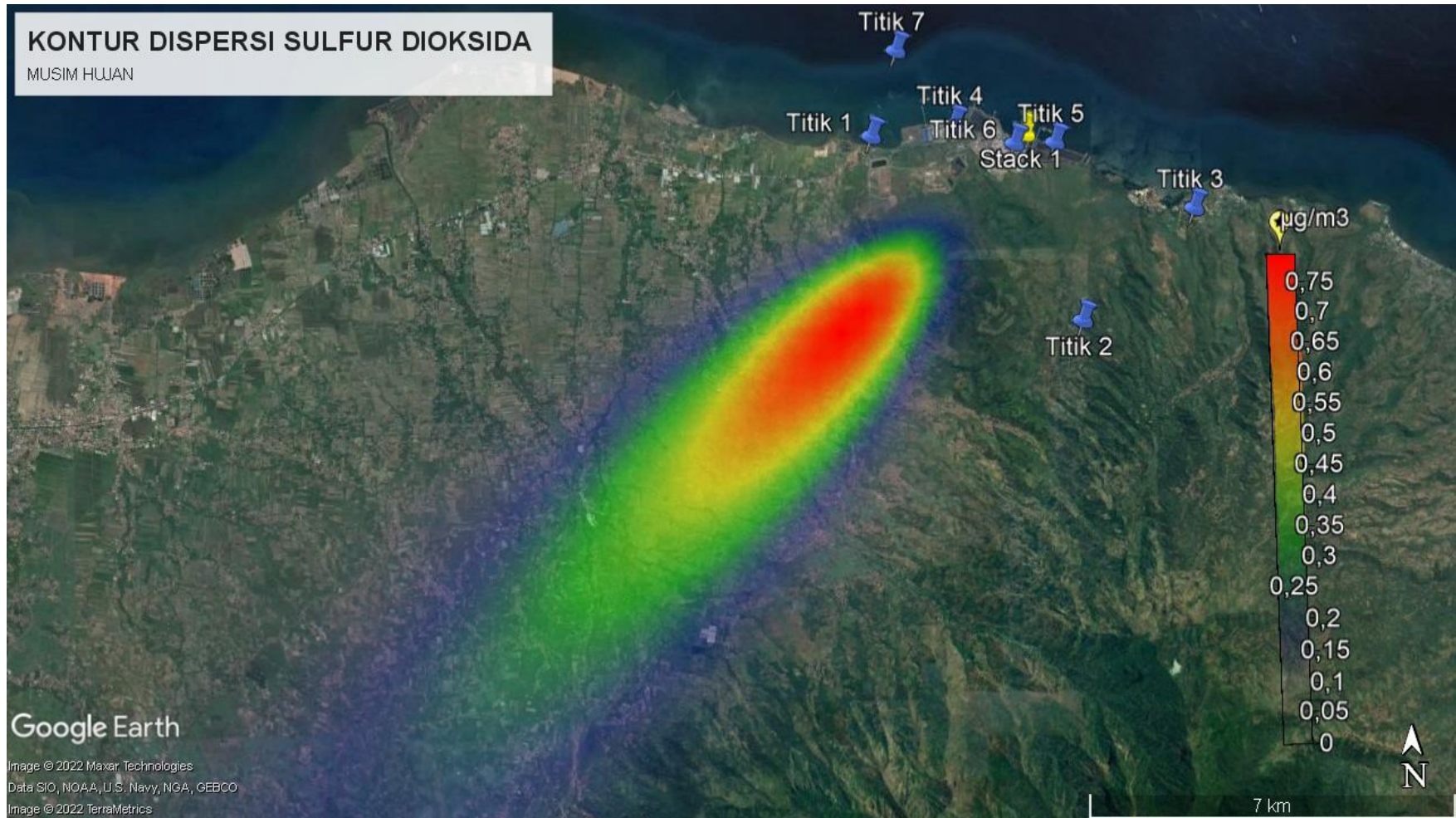
Berdasarkan akumulasi di atas, penyebaran emisi sulfur dioksida di musim kemarau lebih tinggi daripada di musim hujan di titik penerima tertinggi masing-masing. Hal tersebut dikarenakan adanya perbedaan nilai beban emisi di kedua musim. Dengan pengukuran ambien selama 24 jam, emisi yang termodelkan tidak melebihi baku mutu yang dipersyaratkan. Untuk baku mutu udara ambien dengan parameter SO_2 adalah sebesar $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021. Jika menurut Pergub Jatim No. 10 Tahun 2009 adalah $262 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



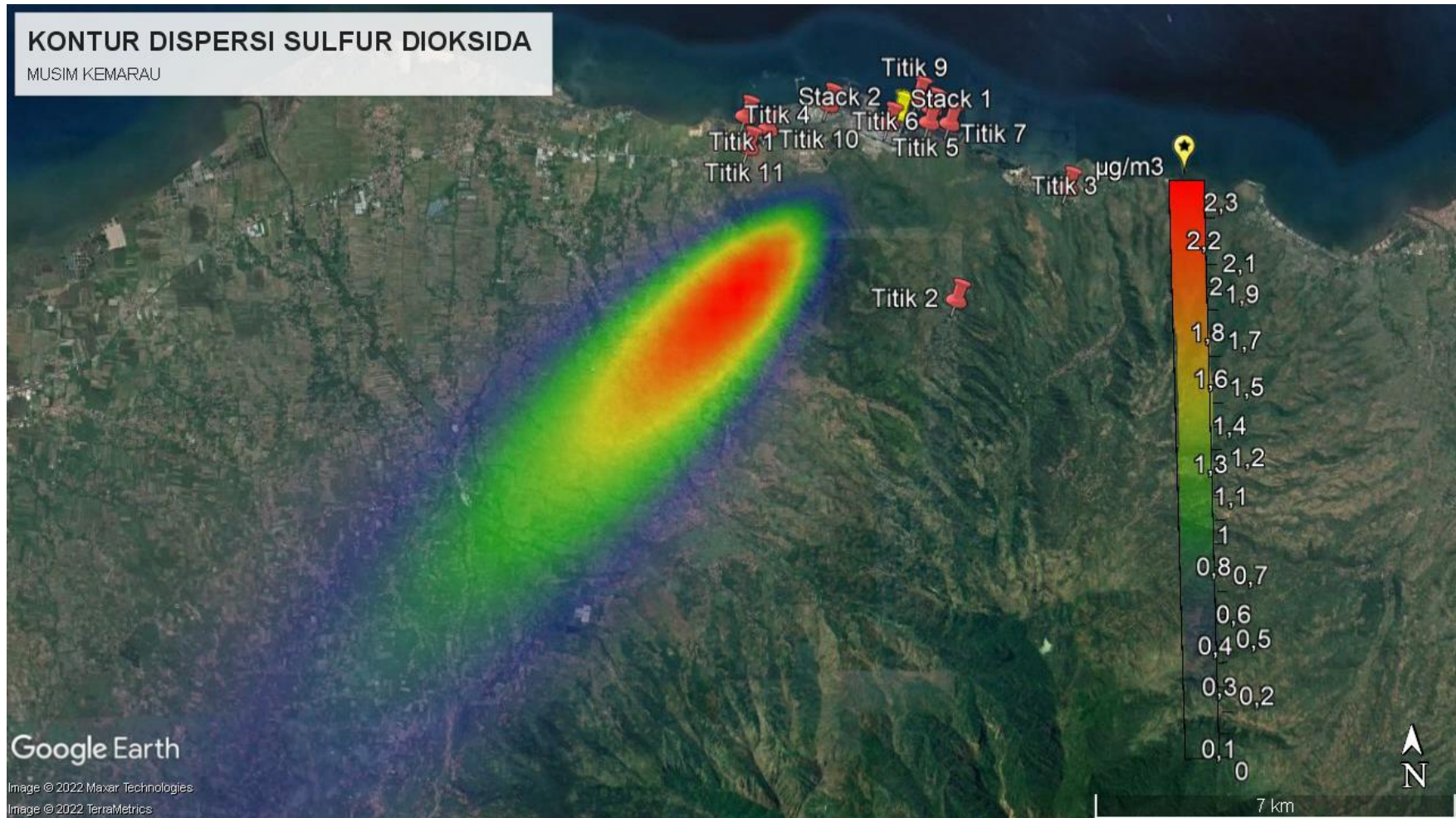
Gambar 4.24 Pola Sebaran Sulfur Dioksida di Musim Hujan



Gambar 4.25 Pola Sebaran Sulfur Dioksida di Musim Kemarau



Gambar 4.26 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida di Musim Hujan



Gambar 4.27 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida di Musim Kemarau

4.9.2 Kontur Dispersi Nitrogen Dioksida

Penggambaran sebaran emisi nitrogen dioksida dinyatakan dalam 2 model yaitu model musim hujan dan model musim kemarau. Penggambaran tersebut dihasilkan pola sebaran emisi nitrogen dioksida dari sumber dengan menyesuaikan arah angin yang mempengaruhinya. Melalui pola tersebut, terdapat nilai konsentrasi yang berbeda dari setiap titik penerima emisi. Berikut adalah nilai indeks standar pencemar udara yang telah dikategorikan melalui rentangnya untuk parameter nitrogen dioksida.

Tabel 4.20 Kategori Tingkat Pencemaran Udara Parameter Nitrogen Dioksida

Kategori	Konsentrasi Emisi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Baik	0 – 400 ^a
Tidak Sehat	400 – 1.130 ^a
Sangat Tidak Sehat	1.130 – 2.260 ^b
Berbahaya	> 2.260 ^b

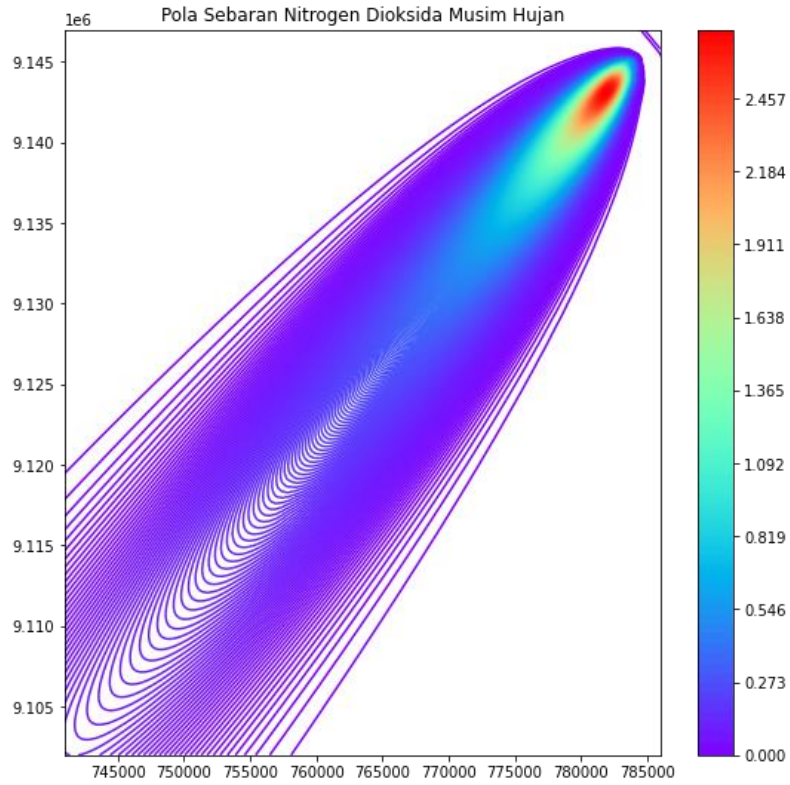
Sumber: ^aPP No. 41 Tahun 1999

^bKep. Bapedal No. 107 Tahun 1997

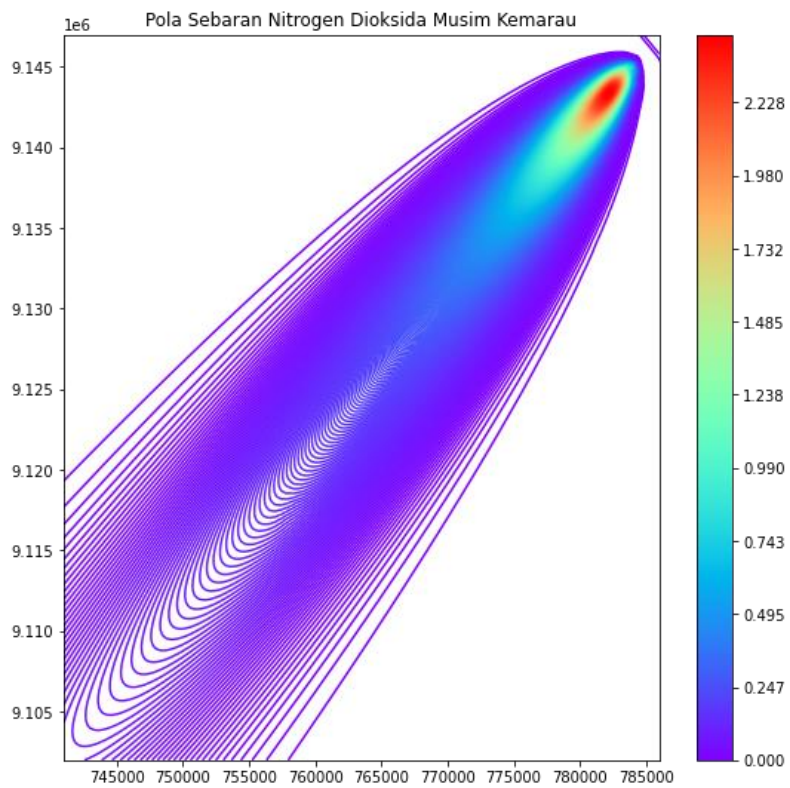
Gambar 4.28 menggambarkan pola sebaran di musim hujan memiliki *scale* konsentrasi emisi tak lebih dari nilai 2,457 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan Gambar 4.29 menggambarkan pola sebaran di musim kemarau memiliki *scale* konsentrasi emisi tak lebih dari nilai 2,228 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Berdasarkan Tabel 4.20, 2 pola sebaran yang tergambar masuk dalam kategori baik. Pada kategori ini, tidak ada dampak yang ditimbulkan kepada manusia maupun kehidupan alam lainnya. Akan tetapi, suatu saat dapat menimbulkan sedikit bau saat terkena paparannya.

Gambar kontur dispersi hasil *overlay* menggambarkan bahwa sebaran emisi jatuh jauh dari area pabrik. Titik penerima emisi didominasi oleh lahan hijau arah barat daya kedua cerobong. Setiap cerobongnya menghasilkan sebaran konsentrasi emisi yang berbeda-beda. Gambar 4.30 merupakan gambaran kontur dispersi nitrogen dioksida di musim hujan, sedangkan Gambar 4.31 yaitu gambaran kontur dispersi nitrogen dioksida di musim kemarau. Jika diakumulasikan, penyebaran di musim hujan tergambar konsentrasi tertinggi pada titik koordinat (781936,455 m; 9143086,957 m) dengan konsentrasi 2,713 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Kemudian, penyebaran di musim kemarau tergambar konsentrasi tertinggi pada titik koordinat (782237,458 m; 9143387,96 m) dengan konsentrasi 2,455 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

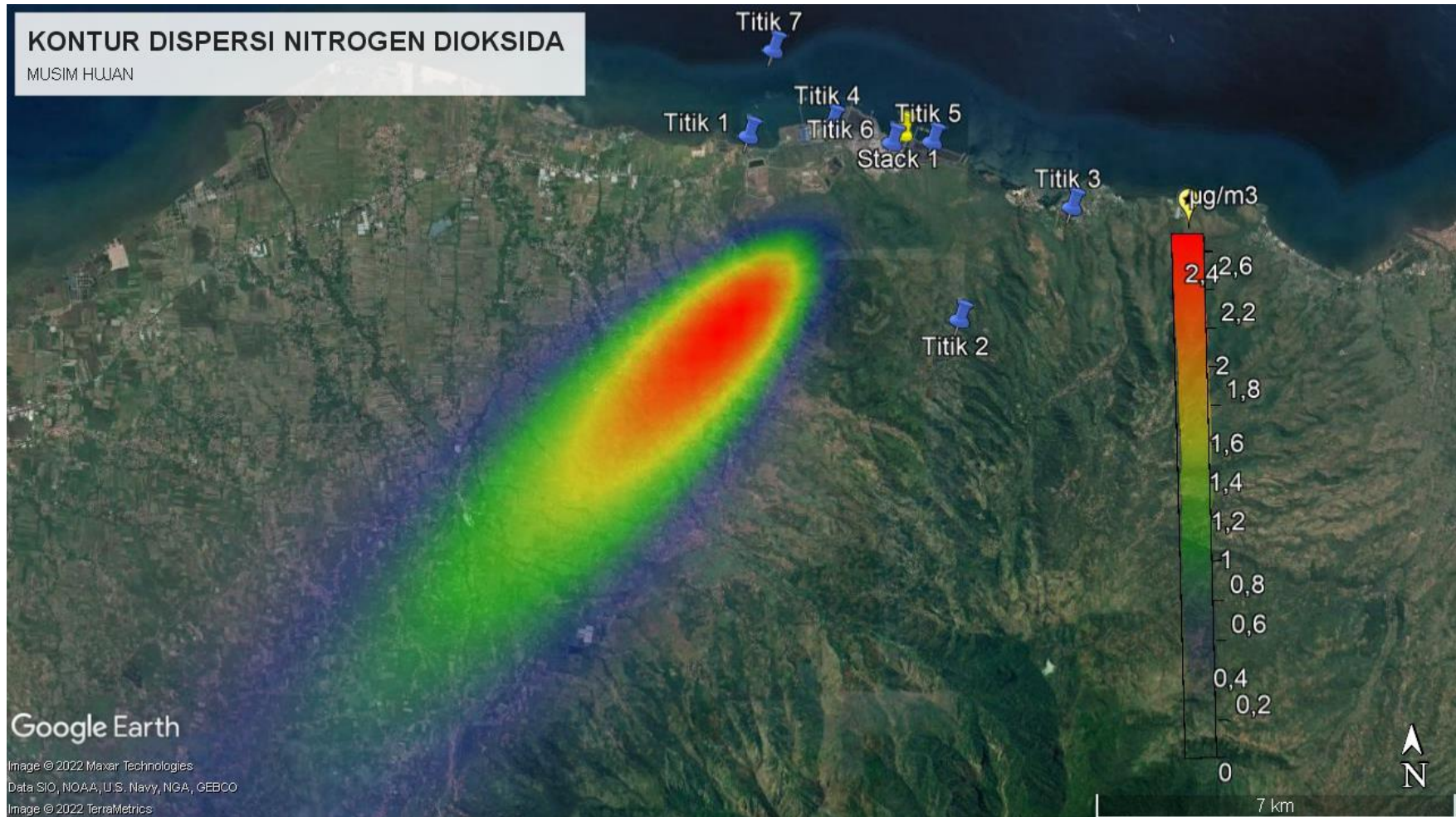
Berdasarkan akumulasi di atas, penyebaran emisi nitrogen dioksida di musim hujan lebih tinggi daripada di musim kemarau di titik penerima tertinggi masing-masing. Hal tersebut dikarenakan adanya perbedaan nilai beban emisi di kedua musim. Dengan pengukuran ambien selama 24 jam, emisi yang termodelkan tidak melebihi baku mutu yang dipersyaratkan. Untuk baku mutu udara ambien dengan parameter NO_2 adalah sebesar 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021.



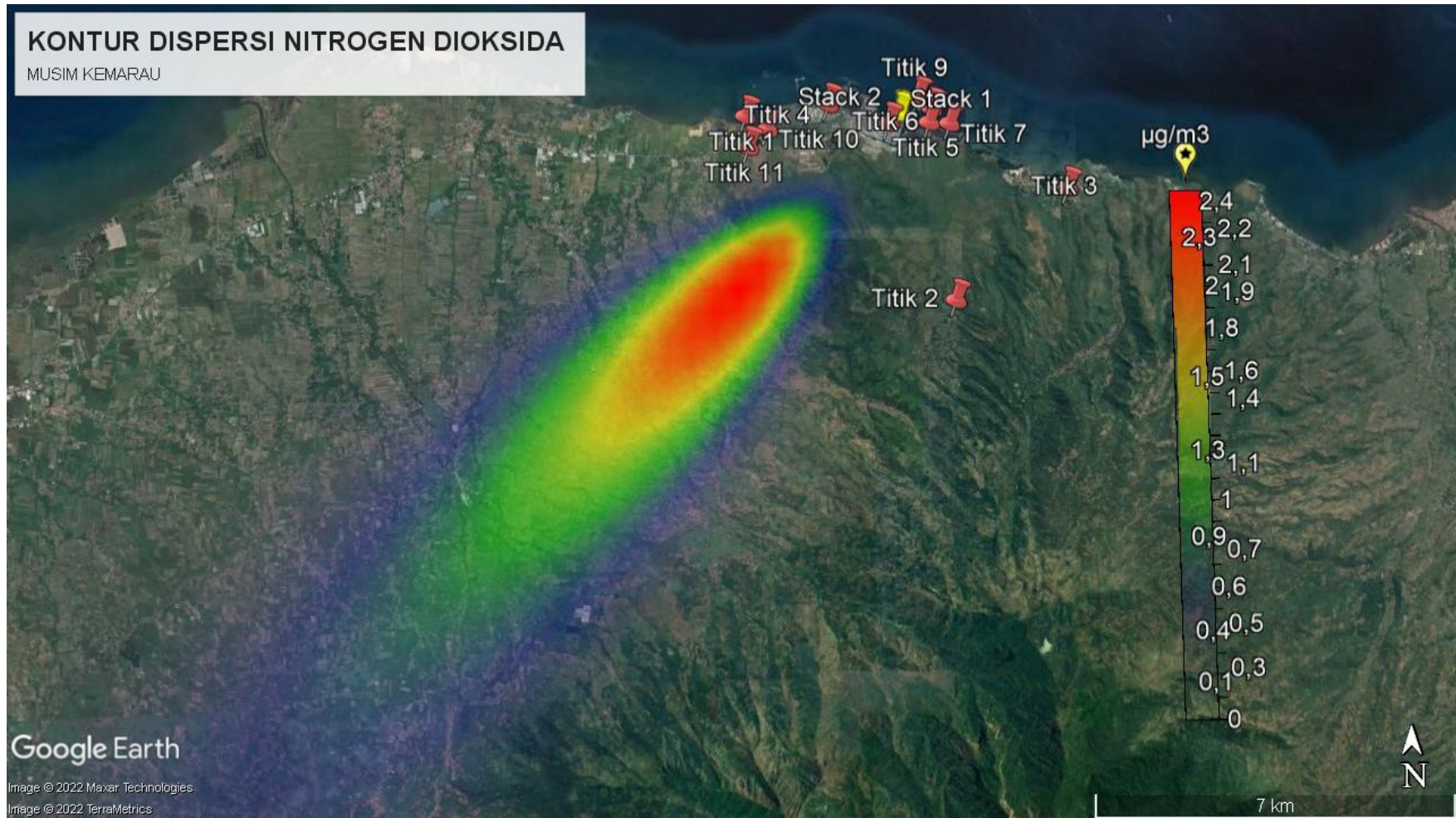
Gambar 4.28 Pola Sebaran Nitrogen Dioksida di Musim Hujan



Gambar 4.29 Pola Sebaran Nitrogen Dioksida di Musim Kemarau



Gambar 4.30 Kontur Dispersi Nitrogen Dioksida di Musim Hujan



Gambar 4.31 Kontur Dispersi Nitrogen Dioksida di Musim Kemarau

4.9.3 Kontur Dispersi Merkuri

Penggambaran sebaran emisi merkuri dinyatakan dalam 2 model yaitu model musim hujan dan model musim kemarau. Penggambaran tersebut dihasilkan pola sebaran emisi merkuri dari sumber dengan menyesuaikan arah angin yang mempengaruhinya. Melalui pola tersebut, terdapat nilai konsentrasi yang berbeda dari setiap titik penerima emisi. Akan tetapi, baku mutu udara ambien / titik penerima emisi untuk parameter merkuri belum tersyaratkan di peraturan di Indonesia.

Merkuri merupakan racun dalam bentuk anorganik yang termasuk unsur logam berat yang menjadi pencemar di udara ambien. Meskipun kadarnya di atmosfer rendah, senyawa ini terakumulasi dalam rantai makanan, misalnya pada ikan predator di danau dan laut hingga sampai ke manusia. Faktanya regulasi di Indonesia belum mensyaratkan parameter tersebut, sedangkan merkuri merupakan parameter yang harus diperhatikan karena efeknya yang dapat merusak jaringan saraf (Mukhtar dkk., 2014). Penelitian ini digunakan baku mutu di beberapa negara sebagai pendekatan baku mutu udara ambien.

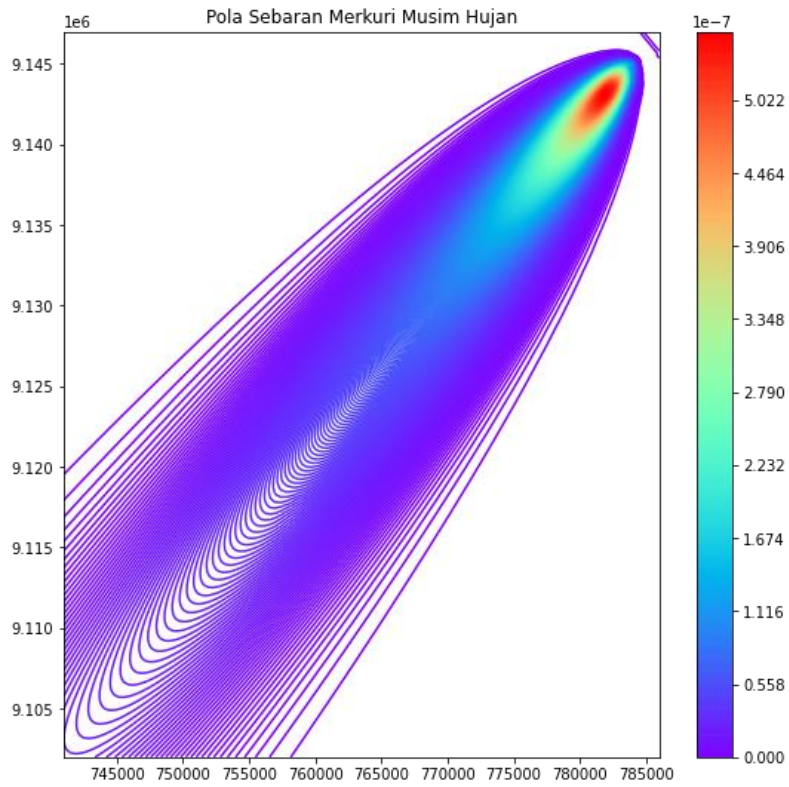
Tabel 4.21 Baku Mutu Hg (Merkuri) di Udara Ambien di Beberapa Negara

No	Negara / Sumber Lainnya	Waktu Pengukuran ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
		1 Tahun	24 Jam
1	WHO, WHO AQGs 2000	1	-
2	OAQC/TCEQ	1	2
3	AFP, dalam Jurnal Atmosphere	1	-
4	AQM second Edition	1	-
5	Vietnam	-	0,3

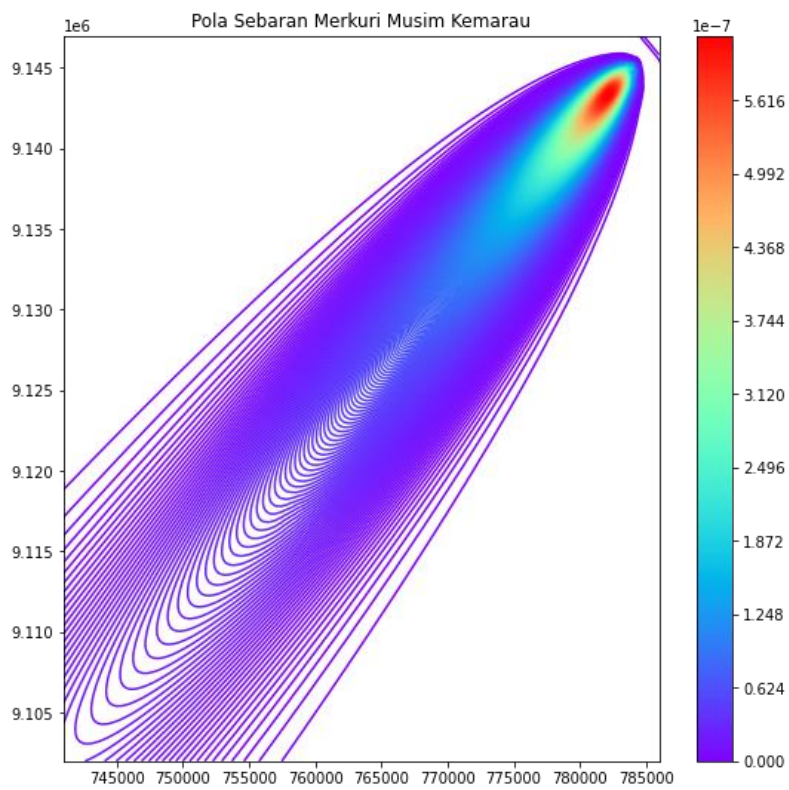
Sumber: Mukhtar dkk., 2014

Gambar 4.32 menggambarkan pola sebaran di musim hujan memiliki *scale* konsentrasi emisi tak lebih dari nilai $5,022e^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan Gambar 4.33 menggambarkan pola sebaran di musim kemarau memiliki *scale* konsentrasi emisi tak lebih dari nilai $5,616e^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$. Gambar kontur dispersi hasil *overlay* menggambarkan bahwa sebaran emisi jatuh jauh dari area pabrik. Titik penerima emisi didominasi oleh lahan hijau arah barat daya kedua cerobong. Setiap cerobongnya menghasilkan sebaran konsentrasi emisi yang berbeda-beda. Gambar 4.34 merupakan gambaran kontur dispersi merkuri di musim hujan, sedangkan Gambar 4.35 yaitu gambaran kontur dispersi merkuri di musim kemarau. Jika diakumulasikan, penyebaran di musim hujan tergambar konsentrasi tertinggi pada titik koordinat (781936,455 m; 9143086,957 m) dengan konsentrasi $5,54e^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$. Kemudian, penyebaran di musim kemarau tergambar konsentrasi tertinggi pada titik koordinat (782237,458 m; 9143387,96 m) dengan konsentrasi $6,17e^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$.

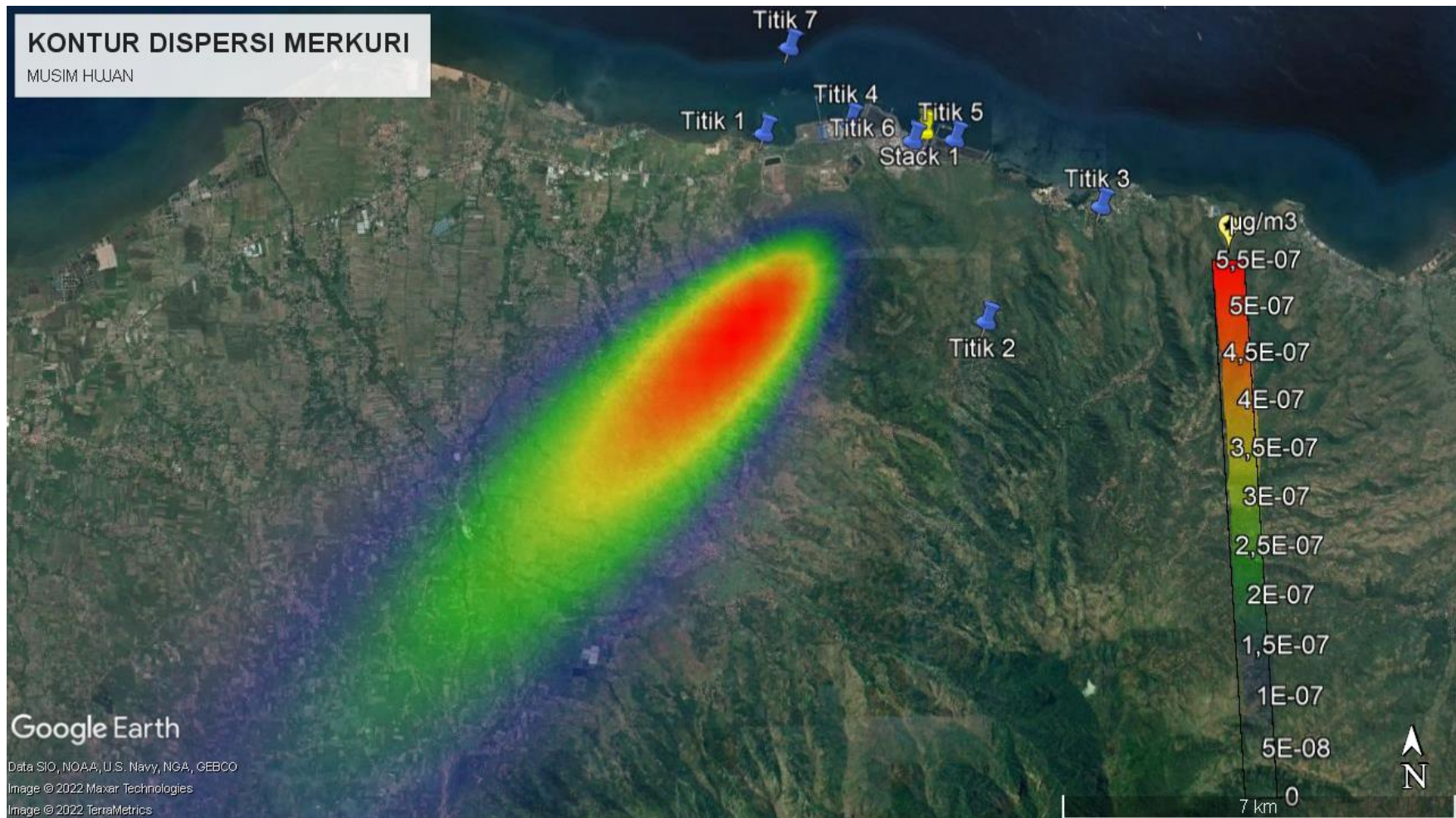
Berdasarkan akumulasi di atas, penyebaran emisi merkuri di musim kemarau lebih tinggi daripada di musim hujan di titik penerima tertinggi masing-masing. Walaupun akumulasi beban emisi di musim hujan lebih tinggi, faktor meteorologi lainnya mempengaruhi sebaran emisi. Berdasarkan Tabel 4.21, konsentrasi emisi hasil dari 2 model tidak ada yang melebihi baku mutu walaupun tidak ada hasil uji parameter merkuri di titik ambien dengan waktu pengukurannya. Dengan demikian, emisi merkuri yang keluar dari kedua cerobong masih dalam batas aman melihat dari hasil 2 model.



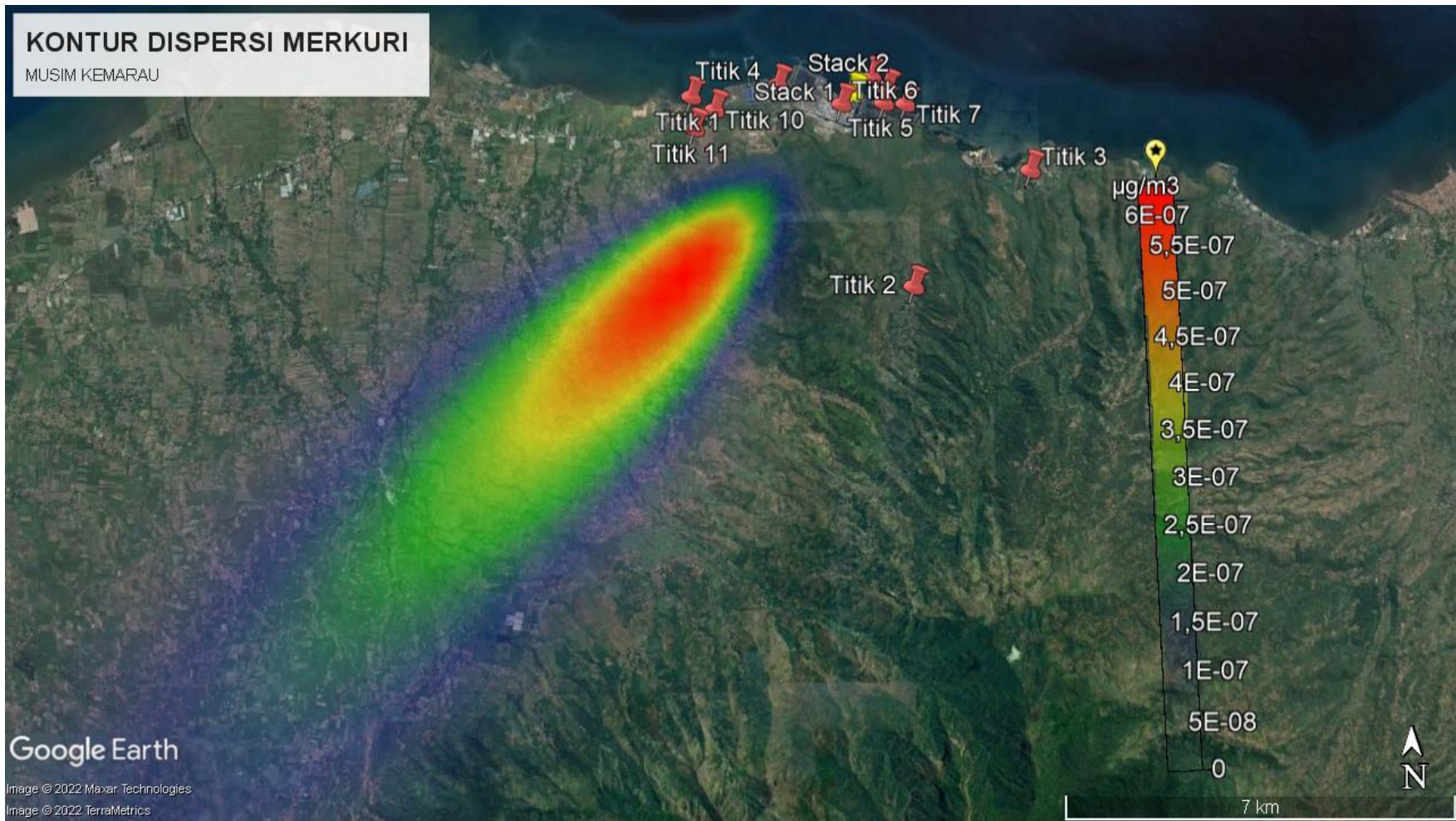
Gambar 4.32 Pola Sebaran Merkuri di Musim Hujan



Gambar 4.33 Pola Sebaran Merkuri di Musim Kemarau



Gambar 4.34 Kontur Dispesi Merkuri di Musim Hujan



Gambar 4.35 Kontur Dispersi Merkuri di Musim Kemarau

Setelah menganalisis dari kontur dispersi 2 model dapat diambil beberapa kesimpulan. Beban emisi sangat mempengaruhi tinggi rendahnya konsentrasi penerima emisi / udara ambien. Hal tersebut dibuktikan dengan akumulasi laju gas emisi sulfur dioksida di musim hujan dan kemarau masing-masing adalah 131,58 g/s dan 351,527 g/s, sedangkan untuk nitrogen dioksida di musim hujan dan kemarau masing-masing adalah 441,866 g/s dan 343,377 g/s. Akan tetapi, untuk hasil model untuk parameter merkuri dipengaruhi oleh data meteorologi lainnya seperti kecepatan emisi saat keluar dari cerobong dan nilai *plume rise*. Akumulasi laju gas emisi merkuri dari sumber di musim hujan dan kemarau masing-masing adalah 0,000904 g/s dan 0,000892 g/s. Angka akumulasi tersebut terbilang kecil hingga tidak muncul perbedaan yang cukup signifikan. Selain itu, dapat disimpulkan juga adanya kesamaan titik penerima akumulasi emisi dengan konsentrasi tertinggi dengan parameter yang berbeda dengan musim yang sama. Di musim hujan titik penerima tertinggi tepat di koordinat (781936,455 m; 9143086,957 m), sedangkan di musim kemarau di koordinat (782237,458 m; 9143387,96 m). Hal tersebut terjadi dikarenakan data meteorologi yang sama di setiap musimnya seperti kecepatan emisi saat keluar dari cerobong, kecepatan angin udara ambien, dan nilai *plume rise*.

Hasil kontur dispersi yang ter-*overlay*-kan menggambarkan pola sebaran yang sama di setiap parameternya dengan musim yang berbeda. Hal tersebut dibuktikan dengan kesamaan titik koordinat tertinggi dari hasil model. Dengan menggunakan arah angin dominan, kedua model mengarah ke area barat daya pabrik. Untuk area penerima emisi tertinggi digambarkan dengan warna merah yang menyentuh area hijau serta sedikit wilayah Desa Krajan, Sukorejo, Kecamatan Karanganyar, Kabupaten Probolinggo. Kemudian, sebaran emisi akan mulai berkurang ditandai dengan warna kuning yang dimulai sekitar wilayah Desa Krajan, Sukorejo, Kecamatan Karanganyar, Kabupaten Probolinggo hingga Desa Kresek Lor, Sambirampak Lor, Kecamatan Kotaanyar, Kabupaten Probolinggo. Selanjutnya, sebaran emisi akan berkurang dari area warna kuning menuju hijau hingga yang terkecil di warna biru.

Hasil 2 model untuk penerima emisi tertinggi (warna merah) berada di area hijau masih dibawah baku mutu yang dipersyaratkan. Namun demikian, dapat dilakukan konservasi alam secara rutin untuk meningkatkan degradasi emisi oleh alam itu sendiri. Selain itu, diperlukan penambahan beberapa titik uji emisi yang jauh dari area perusahaan hingga menyentuh area pemukiman secara mendalam seperti di Desa Krajan dan beberapa yang telah disebutkan di atas. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan parameter dispersi serta data meteorologi lainnya yang mempengaruhi jauhnya sebaran emisi salah satunya kecepatan alir gas cerobong yang tinggi. Berikut merupakan tampilan titik penerima tertinggi akumulasi dua model.



Gambar 4.36 Tampak Atas Titik Penerima Tertinggi di Musim Hujan



Gambar 4.37 Tampak Atas Titik Penerima Tertinggi di Musim Kemarau

4.10 Validasi Model

Validasi model dilakukan untuk memeriksa kebenaran hasil *running* pemrograman Python secara manual. Validasi tersebut dimaksudkan untuk membandingkan kedua hasil perhitungan. Hasil dari bahasa pemrograman Python divalidasikan dengan perhitungan manual menggunakan *microsoft excel*. Perbandingan digunakan beberapa titik yang menerima konsentrasi paling tinggi di setiap cerobong, di setiap parameter, serta di setiap musim. Untuk konsentrasi emisi akumulasi tidak dilakukan verifikasi. Hal tersebut dikarenakan nilai akumulasi merupakan gabungan dari konsentrasi penerima emisi di cerobong 1 dan cerobong 2 yang mana memiliki jarak yang berbeda dari cerobongnya masing-masing. Berikut merupakan rangkuman titik tertinggi di setiap cerobong, di setiap parameter, serta di setiap musim sekaligus untuk akumulasinya berdasarkan *running* pemrograman Python yang dibuat.

Tabel 4.22 Hasil Perhitungan Konsentrasi Emisi Tertinggi SO₂ di Musim Hujan

No	Cerobong	X_lon	Y_lat	X_utm	Y_utm	Zc	σ_y	σ_z	xa	ya	C
1	C1	113,5574	-7,74325	782086,957	9143237,458	41	813,8003	889,1988	4445,994	13,788	0,434
2	C2	113,5547	-7,74599	781785,953	9142936,455	65	881,5284	977,871	4889,355	52,678	0,370
3	C1+C2	113,5556	-7,74462	781936,455	9143086,957	60	-	-	-	-	0,802

Sumber: Data Perhitungan

Tabel 4.23 Hasil Perhitungan Konsentrasi Emisi Tertinggi SO₂ di Musim Kemarau

No	Cerobong	X_lon	Y_lat	X_utm	Y_utm	Zc	σ_y	σ_z	xa	ya	C
1	C1	113,5601	-7,74051	782387,96	9143538,462	60	746,9706	804,0622	4020,311	13,787	1,528
2	C2	113,5556	-7,74462	781936,455	9143086,957	60	849,2458	935,3026	4676,513	52,678	0,959
3	C1+C2	113,5587	-7,74188	782237,458	9143387,96	58	-	-	-	-	2,465

Sumber: Data Perhitungan

Tabel 4.24 Hasil Perhitungan Konsentrasi Emisi Tertinggi NO₂ di Musim Hujan

No	Cerobong	X_lon	Y_lat	X_utm	Y_utm	Zc	σ_y	σ_z	xa	ya	C
1	C1	113,5574	-7,74325	782086,957	9143237,458	41	813,8003	889,1988	4445,994	13,788	1,583
2	C2	113,5547	-7,74599	781785,953	9142936,455	65	881,5284	977,871	4889,355	52,678	1,137
3	C1+C2	113,5556	-7,74462	781936,455	9143086,957	60	-	-	-	-	2,713

Sumber: Data Perhitungan

Tabel 4.25 Hasil Perhitungan Konsentrasi Emisi Tertinggi NO₂ di Musim Kemarau

No	Cerobong	X_lon	Y_lat	X_utm	Y_utm	Zc	σ_y	σ_z	xa	ya	C
1	C1	113,5601	-7,74051	782387,96	9143538,462	60	746,9706	804,0622	4020,311	13,787	1,681
2	C2	113,5556	-7,74462	781936,455	9143086,957	60	849,2458	935,3026	4676,513	52,678	0,794
3	C1+C2	113,5587	-7,74188	782237,458	9143387,96	58	-	-	-	-	2,455

Sumber: Data Perhitungan

Tabel 4.26 Hasil Perhitungan Konsentrasi Emisi Tertinggi Hg di Musim Hujan

No	Cerobong	X_lon	Y_lat	X_utm	Y_utm	Zc	σ_y	σ_z	xa	ya	C
1	C1	113,5574	-7,74325	782086,957	9143237,458	41	813,8003	889,1988	4445,994	13,788	3,04E-07
2	C2	113,5547	-7,74599	781785,953	9142936,455	65	881,5284	977,871	4889,355	52,678	2,52E-07
3	C1+C2	113,5556	-7,74462	781936,455	9143086,957	60	-	-	-	-	5,54E-07

Sumber: Data Perhitungan

Tabel 4.27 Hasil Perhitungan Konsentrasi Emisi Tertinggi Hg di Musim Kemarau

No	Cerobong	X_lon	Y_lat	X_utm	Y_utm	Zc	σ_y	σ_z	xa	ya	C
1	C1	113,5601	-7,74051	782387,96	9143538,462	60	746,9706	804,0622	4020,311	13,787	3,57E-07
2	C2	113,5556	-7,74462	781936,455	9143086,957	60	849,2458	935,3026	4676,513	52,678	2,65E-07
3	C1+C2	113,5587	-7,74188	782237,458	9143387,96	58	-	-	-	-	6,17E-07

Sumber: Data Perhitungan

Keterangan

C1 = cerobong 1 PT X

C2 = cerobong 2 PT X

X_lon = koordinat penerima emisi berdasarkan garis lintang (Latitude)

Y_lon = koordinat penerima emisi berdasarkan garis bujur (Longitude)

X_utm = koordinat penerima emisi sumbu-x berdasarkan UTM (m)

Y_utm = koordinat penerima emisi sumbu-y berdasarkan UTM (m)

Zc = elevasi titik penerima emisi (m)

σ_y = koefisien dispersi arah horizontal (m)

σ_z = koefisien dispersi arah vertikal (m)

xa = jarak sumbu-x titik reseptor dengan sumber emisi (m)

ya = jarak sumbu-y titik reseptor dengan sumber emisi (m)

C = konsentrasi emisi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Proses perhitungan manual dimulai dengan memasukkan nilai X_utm dan Y_utm sebagai titik reseptor emisi. Kemudian, data laju gas dapat dimasukkan sesuai emisi yang diinginkan beserta sumber emisinya (cerobong 1 / cerobong 2) beserta koordinatnya dalam bentuk UTM. Selanjutnya, dilakukan Kembali input data meteorologi yang mempengaruhi perhitungan seperti kecepatan emisi saat keluar dari cerobong, kecepatan angin udara ambien, dan nilai *plume rise*. Hingga akhirnya dapat dilakukan perhitungan nilai konsentrasi seperti contoh perhitungan pada Bab 4.6. Berikut merupakan rangkuman hasil perhitungan manual melalui *microsoft excel* untuk setiap konsentrasi tertinggi di setiap cerobong dan setiap parameternya.

Tabel 4.28 Hasil Perhitungan Manual Untuk Titik Konsentrasi Maksimum

No	Parameter	Asal Cerobong	Musim	X_utm	Y_utm	Zc	xa	ya	σ_y	σ_z	C	C_M
1	SO ₂	C1	Hujan	782086,957	9143237,458	41	4445,994	13,788	813,800	889,1988	0,434	0,434
			Kemarau	782387,96	9143538,462	60	4020,311	13,787	746,971	804,062	1,529	1,528
		C2	Hujan	781785,953	9142936,455	65	4889,355	52,678	881,528	977,871	0,371	0,370
			Kemarau	781936,455	9143086,957	60	4676,513	52,678	849,246	935,303	0,963	0,959
2	NO ₂	C1	Hujan	782086,957	9143237,458	41	4445,994	13,788	813,800	889,199	1,58	1,58
			Kemarau	782387,96	9143538,462	60	4020,311	13,787	746,971	804,062	1,68	1,68
		C2	Hujan	781785,953	9142936,455	65	4889,355	52,678	881,528	977,871	1,14	1,14
			Kemarau	781936,455	9143086,957	60	4676,513	52,678	849,246	935,303	0,80	0,79
3	Hg	C1	Hujan	782086,957	9143237,458	41	4445,994	13,788	813,800	889,199	3,040E-07	3,040E-07
			Kemarau	782387,96	9143538,462	60	4020,311	13,787	746,971	804,062	3,574E-07	3,575E-07
		C2	Hujan	781785,953	9142936,455	65	4889,355	52,678	881,528	977,871	2,501E-07	2,516E-07
			Kemarau	781936,455	9143086,957	60	4676,513	52,678	849,246	935,303	2,674E-07	2,653E-07

Sumber: Data Perhitungan

Keterangan

C1 = cerobong 1 PT X

C2 = cerobong 2 PT X

X_utm = koordinat penerima emisi sumbu-x berdasarkan UTM (m)

Y_utm = koordinat penerima emisi sumbu-y berdasarkan UTM (m)

Zc = elevasi titik penerima emisi (m)

xa = jarak sumbu-x titik reseptor dengan sumber emisi (m)

ya = jarak sumbu-y titik reseptor dengan sumber emisi (m)

σ_y = koefisien dispersi arah horizontal (m)

σ_z = koefisien dispersi arah vertikal (m)

C = konsentrasi emisi berdasarkan koordinat (X_utm; Y_utm) dengan asal cerobongnya dengan perhitungan manual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_M = konsentrasi emisi dengan hasil *running* pemrograman Python ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Melalui hasil perhitungan manual, didapatkan nilai yang sama dari nilai konsentrasi perhitungan manual dengan nilai konsentrasi hasil *running* pemrograman Python. Akan tetapi, ada beberapa nilai di belakang koma yang berbeda. Perbedaan tersebut dapat dimungkinkan karena adanya perbedaan nilai desimal antara perhitungan manual dengan hasil *running* pemrograman Python yang terlalu rinci. Selain nilai konsentrasi emisi, nilai yang dihitung melalui pemrograman Python memiliki nilai sama seperti xa, ya, σ_y , dan σ_z .

Perbedaan koma antara perhitungan manual dengan model dilakukan analisis dengan membandingkan nilai perhitungan model dengan perhitungan manual. Analisis tersebut dilakukan dengan cara mengambil 15 hasil teratas di setiap parameter, cerobong, dan musimnya. Kemudian, parameter dispersi maupun koordinat di 15 titik tersebut dilakukan perhitungan secara manual. Jika nilai persen *error* yang dihasilkan mendekati 0%, maka kedua nilai -perhitungan manual dan model- tidak terdapat perbedaan yang berarti. Berikut merupakan hasil pemeriksaan dari kedua nilai yang diuji.

Tabel 4.29 Persen *Error* Perhitungan Manual dan Model Cerobong 1 Musim Hujan

No	x_utm	y_utm	SO ₂			NO ₂			Hg		
			C Manual	C Model	%Error	C Manual	C Model	%Error	C Manual	C Model	%Error
1	782086,957	9143237	0,4344	0,4343	0,03%	1,5837	1,5832	0,03%	3,0E-07	3,0E-07	0,03%
2	781936,455	9143087	0,4336	0,4335	0,03%	1,5808	1,5804	0,03%	3,0E-07	3,0E-07	0,03%
3	782237,458	9143388	0,4323	0,4321	0,03%	1,5759	1,5754	0,03%	3,0E-07	3,0E-07	0,03%
4	781936,455	9143237	0,4368	0,4314	1,24%	1,5926	1,5729	1,24%	3,1E-07	3,0E-07	1,24%
5	782086,957	9143388	0,4365	0,4306	1,34%	1,5913	1,5700	1,34%	3,1E-07	3,0E-07	1,34%
6	782086,957	9143087	0,4392	0,4301	2,07%	1,6011	1,5679	2,07%	3,1E-07	3,0E-07	2,07%
7	781785,953	9142936	0,4297	0,4296	0,02%	1,5665	1,5661	0,02%	3,0E-07	3,0E-07	0,02%
8	781785,953	9143087	0,4344	0,4294	1,15%	1,5836	1,5654	1,15%	3,0E-07	3,0E-07	1,15%
9	782237,458	9143237	0,4389	0,4290	2,25%	1,6001	1,5642	2,25%	3,1E-07	3,0E-07	2,25%
10	781936,455	9142936	0,4362	0,4278	1,92%	1,5901	1,5596	1,92%	3,1E-07	3,0E-07	1,92%
11	782237,458	9143538	0,4326	0,4262	1,46%	1,5770	1,5540	1,46%	3,0E-07	3,0E-07	1,46%
12	782387,96	9143538	0,4253	0,4252	0,03%	1,5506	1,5501	0,03%	3,0E-07	3,0E-07	0,03%
13	781635,452	9142936	0,4290	0,4244	1,07%	1,5639	1,5473	1,07%	3,0E-07	3,0E-07	1,07%
14	782387,96	9143388	0,4347	0,4240	2,45%	1,5847	1,5459	2,45%	3,0E-07	3,0E-07	2,45%
15	781635,452	9142786	0,4234	0,4233	0,02%	1,5437	1,5433	0,02%	3,0E-07	3,0E-07	0,02%

Sumber: Data Perhitungan

Tabel 4.30 Persen *Error* Perhitungan Manual dan Model Cerobong 2 Musim Hujan

No	x_utm	y_utm	SO ₂			NO ₂			Hg		
			C Manual	C Model	% <i>Error</i>	C Manual	C Model	% <i>Error</i>	C Manual	C Model	% <i>Error</i>
1	781785,953	9142936	0,3712	0,3698	0,36%	1,1409	1,1368	0,36%	2,5E-07	2,5E-07	-0,54%
2	781635,452	9142936	0,3707	0,3694	0,36%	1,1396	1,1355	0,36%	2,5E-07	2,5E-07	-0,54%
3	781785,953	9143087	0,3708	0,3694	0,38%	1,1398	1,1354	0,38%	2,5E-07	2,5E-07	-0,51%
4	781635,452	9142786	0,3698	0,3686	0,33%	1,1367	1,1330	0,33%	2,5E-07	2,5E-07	-0,56%
5	781936,455	9143087	0,3698	0,3684	0,38%	1,1368	1,1324	0,38%	2,5E-07	2,5E-07	-0,51%
6	781484,95	9142786	0,3684	0,3672	0,33%	1,1324	1,1286	0,33%	2,5E-07	2,5E-07	-0,56%
7	781936,455	9143237	0,3676	0,3661	0,42%	1,1300	1,1253	0,42%	2,5E-07	2,5E-07	-0,48%
8	781484,95	9142635	0,3665	0,3654	0,31%	1,1267	1,1232	0,31%	2,5E-07	2,5E-07	-0,58%
9	781785,953	9142786	0,3760	0,3644	3,09%	1,1558	1,1201	3,09%	2,5E-07	2,5E-07	2,22%
10	781635,452	9143087	0,3765	0,3643	3,25%	1,1574	1,1198	3,25%	2,5E-07	2,5E-07	2,38%
11	781936,455	9142936	0,3765	0,3640	3,32%	1,1573	1,1189	3,32%	2,5E-07	2,5E-07	2,46%
12	782086,957	9143237	0,3651	0,3635	0,42%	1,1221	1,1174	0,42%	2,5E-07	2,5E-07	-0,48%
13	781484,95	9142936	0,3749	0,3635	3,03%	1,1523	1,1174	3,03%	2,5E-07	2,5E-07	2,16%
14	781334,448	9142635	0,3644	0,3632	0,31%	1,1200	1,1165	0,31%	2,5E-07	2,5E-07	-0,58%
15	781635,452	9142635	0,3733	0,3625	2,89%	1,1473	1,1141	2,89%	2,5E-07	2,5E-07	2,02%

Sumber: Data Perhitungan

Tabel 4.31 Persen *Error* Perhitungan Manual dan Model Cerobong 1 Musim Kemarau

No	x_utm	y_utm	SO ₂			NO ₂			Hg		
			C Manual	C Model	%Error	C Manual	C Model	%Error	C Manual	C Model	%Error
1	782387,96	9143538	1,5289	1,5284	0,03%	1,6815	1,6809	0,03%	3,6E-07	3,6E-07	0,03%
2	782237,458	9143388	1,5238	1,5233	0,03%	1,6758	1,6753	0,03%	3,6E-07	3,6E-07	0,03%
3	782538,462	9143689	1,5176	1,5170	0,04%	1,6690	1,6684	0,04%	3,5E-07	3,5E-07	0,04%
4	782237,458	9143538	1,5392	1,5167	1,46%	1,6928	1,6680	1,46%	3,6E-07	3,5E-07	1,46%
5	782387,96	9143689	1,5365	1,5120	1,60%	1,6899	1,6629	1,60%	3,6E-07	3,5E-07	1,60%
6	782387,96	9143388	1,5467	1,5089	2,45%	1,7011	1,6595	2,45%	3,6E-07	3,5E-07	2,45%
7	782538,462	9143538	1,5493	1,5078	2,68%	1,7039	1,6583	2,68%	3,6E-07	3,5E-07	2,68%
8	782086,957	9143237	1,5061	1,5057	0,03%	1,6564	1,6559	0,03%	3,5E-07	3,5E-07	0,03%
9	782086,957	9143388	1,5257	1,5053	1,34%	1,6780	1,6555	1,34%	3,6E-07	3,5E-07	1,34%
10	782237,458	9143237	1,5337	1,4992	2,25%	1,6868	1,6488	2,25%	3,6E-07	3,5E-07	2,25%
11	782538,462	9143839	1,5179	1,4913	1,76%	1,6694	1,6401	1,76%	3,6E-07	3,5E-07	1,76%
12	782688,963	9143839	1,4881	1,4875	0,04%	1,6366	1,6359	0,04%	3,5E-07	3,5E-07	0,04%
13	781936,455	9143237	1,5032	1,4846	1,24%	1,6532	1,6327	1,24%	3,5E-07	3,5E-07	1,24%
14	782688,963	9143689	1,5286	1,4836	2,94%	1,6812	1,6317	2,94%	3,6E-07	3,5E-07	2,94%
15	781936,455	9143087	1,4811	1,4807	0,03%	1,6289	1,6284	0,03%	3,5E-07	3,5E-07	0,03%

Sumber: Data Perhitungan

Tabel 4.32 Persen *Error* Perhitungan Manual dan Model Cerobong 2 Musim Kemarau

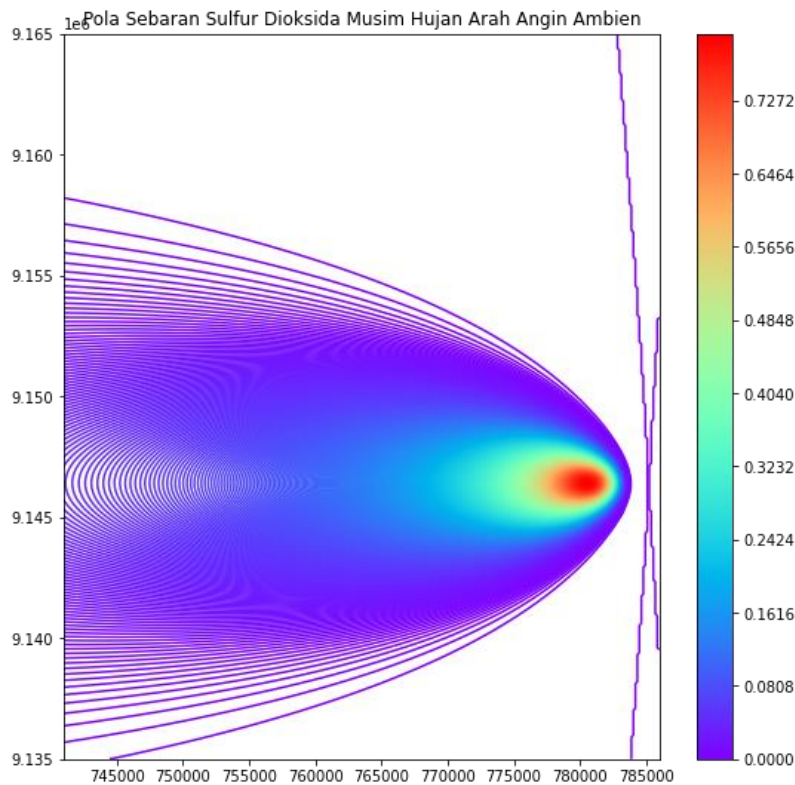
No	x_utm	y_utm	SO ₂			NO ₂			Hg		
			C Manual	C Model	%Error	C Manual	C Model	%Error	C Manual	C Model	%Error
1	781936,455	9143087	0,9631	0,9594	0,38%	0,7976	0,7945	0,38%	2,7E-07	2,7E-07	0,83%
2	781785,953	9143087	0,9623	0,9586	0,38%	0,7969	0,7939	0,38%	2,7E-07	2,7E-07	0,84%
3	781936,455	9143237	0,9612	0,9572	0,42%	0,7959	0,7926	0,42%	2,7E-07	2,6E-07	0,87%
4	781785,953	9142936	0,9600	0,9566	0,36%	0,7950	0,7922	0,36%	2,7E-07	2,6E-07	0,81%
5	782086,957	9143237	0,9583	0,9543	0,42%	0,7935	0,7902	0,42%	2,7E-07	2,6E-07	0,87%
6	781635,452	9142936	0,9561	0,9527	0,36%	0,7917	0,7889	0,36%	2,7E-07	2,6E-07	0,81%
7	782086,957	9143388	0,9531	0,9488	0,45%	0,7892	0,7857	0,45%	2,6E-07	2,6E-07	0,90%
8	781635,452	9142786	0,9510	0,9478	0,33%	0,7875	0,7849	0,33%	2,6E-07	2,6E-07	0,78%
9	781936,455	9142936	0,9771	0,9446	3,32%	0,8091	0,7822	3,32%	2,7E-07	2,6E-07	3,76%
10	781785,953	9143237	0,9775	0,9434	3,49%	0,8095	0,7812	3,49%	2,7E-07	2,6E-07	3,93%
11	782086,957	9143087	0,9781	0,9430	3,58%	0,8099	0,7809	3,58%	2,7E-07	2,6E-07	4,02%
12	781635,452	9143087	0,9740	0,9424	3,25%	0,8066	0,7804	3,25%	2,7E-07	2,6E-07	3,68%
13	782237,458	9143388	0,9464	0,9421	0,45%	0,7837	0,7802	0,45%	2,6E-07	2,6E-07	0,90%
14	781484,95	9142786	0,9448	0,9417	0,33%	0,7824	0,7798	0,33%	2,6E-07	2,6E-07	0,78%
15	781785,953	9142786	0,9697	0,9397	3,09%	0,8030	0,7782	3,09%	2,7E-07	2,6E-07	3,53%

Sumber: Data Perhitungan

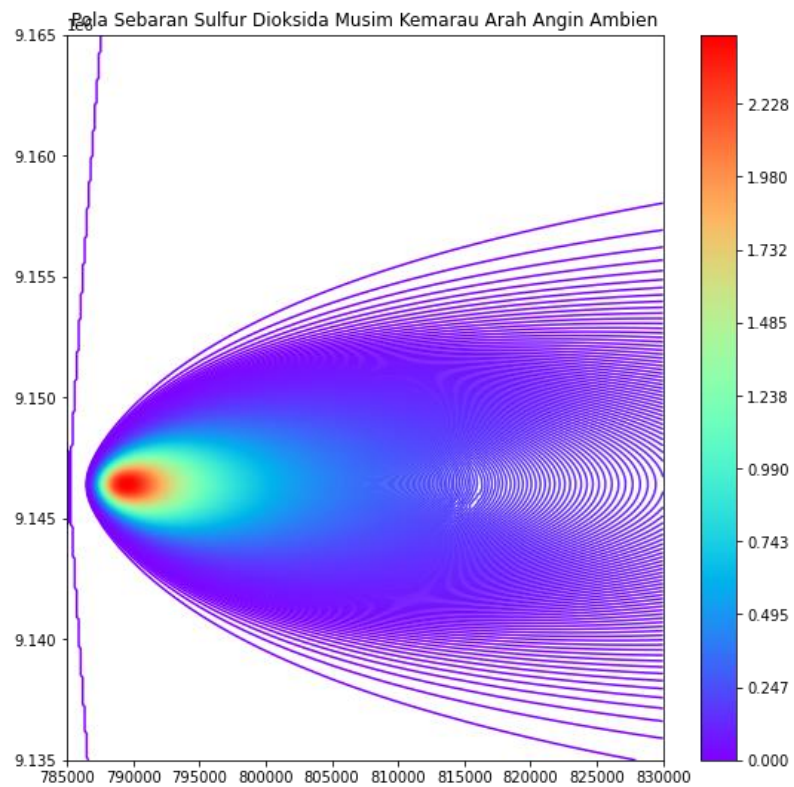
Hasil perbandingan di atas didapatkan nilai persen *error* yang beragam di setiap parameter, cerobong, maupun musimnya. Walaupun dengan nilai parameter dispersi yang sama di setiap titik, terdapat perbedaan hasil konsentrasi secara manual dan model. Dari keseluruhan hasil didapatkan persen *error* maksimal adalah 4,02%. Selain itu, terdapat juga persen *error* yang bernilai negatif dari nilai perhitungan manual pada beberapa pemeriksaan di parameter merkuri yang berasal dari cerobong 2 di musim hujan dikarenakan perhitungan model lebih besar dari perhitungan manual. Dengan demikian, dengan persen *error* yang berada dalam angka menuju 0% dapat disimpulkan bahwa hasil perhitungan manual dengan model dapat dinyatakan sama.

4.11 Verifikasi Model

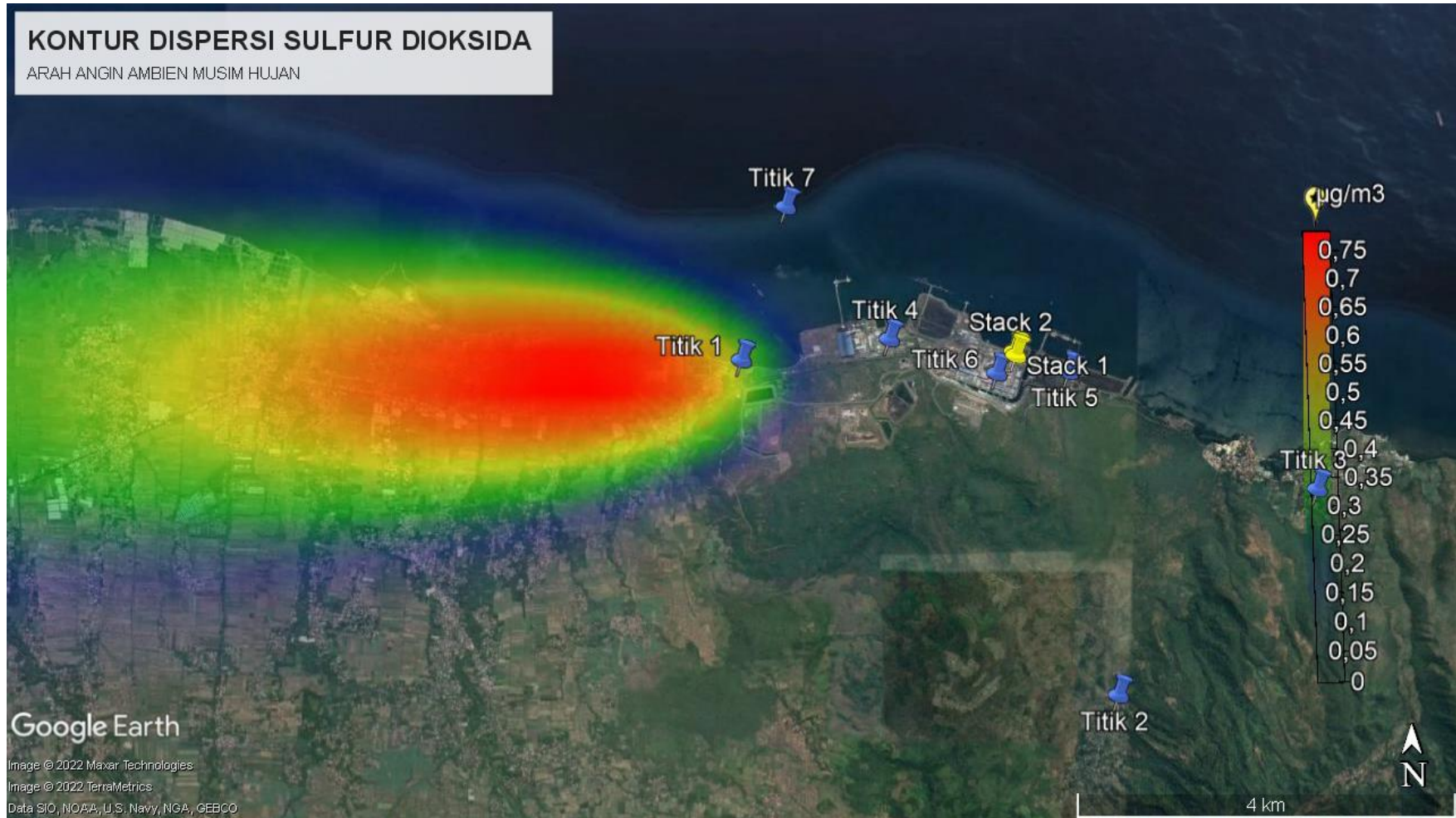
Verifikasi model dilakukan untuk menyesuaikan apakah data yang dimodelkan sama dengan data asli lapangan yang diuji. Data hasil uji ambien didapatkan dari beberapa stasiun pemantau yang tersebar di sekitar PT X. Akan tetapi, dari seluruh kontur yang dihasilkan pada gambar overlay tidak satupun kontur dispersi yang menyentuh stasiun pemantau yang ada. Dengan demikian, dilakukan dengan beberapa penyesuaian dengan memakai arah angin dari hasil uji ambien dari Tabel 4.3 hingga Tabel 4.14. Data tersebut digunakan rata-rata arah angin dominan masing-masing untuk musim hujan dan kemarau. Dari rata-rata tersebut, arah angin barat mewakili verifikasi model untuk musim hujan, sedangkan untuk musim kemarau menggunakan arah angin timur. Selain itu, parameter yang diverifikasi hanya sulfur dioksida dan nitrogen dioksida saja dikarenakan parameter merkuri tidak diujikan oleh stasiun pemantau dengan merata-rata kedua tersebut berdasarkan musimnya masing-masing. Berikut merupakan pola sebaran dan kontur dispersi yang telah di-*overlay*-kan ke *Google Earth*.



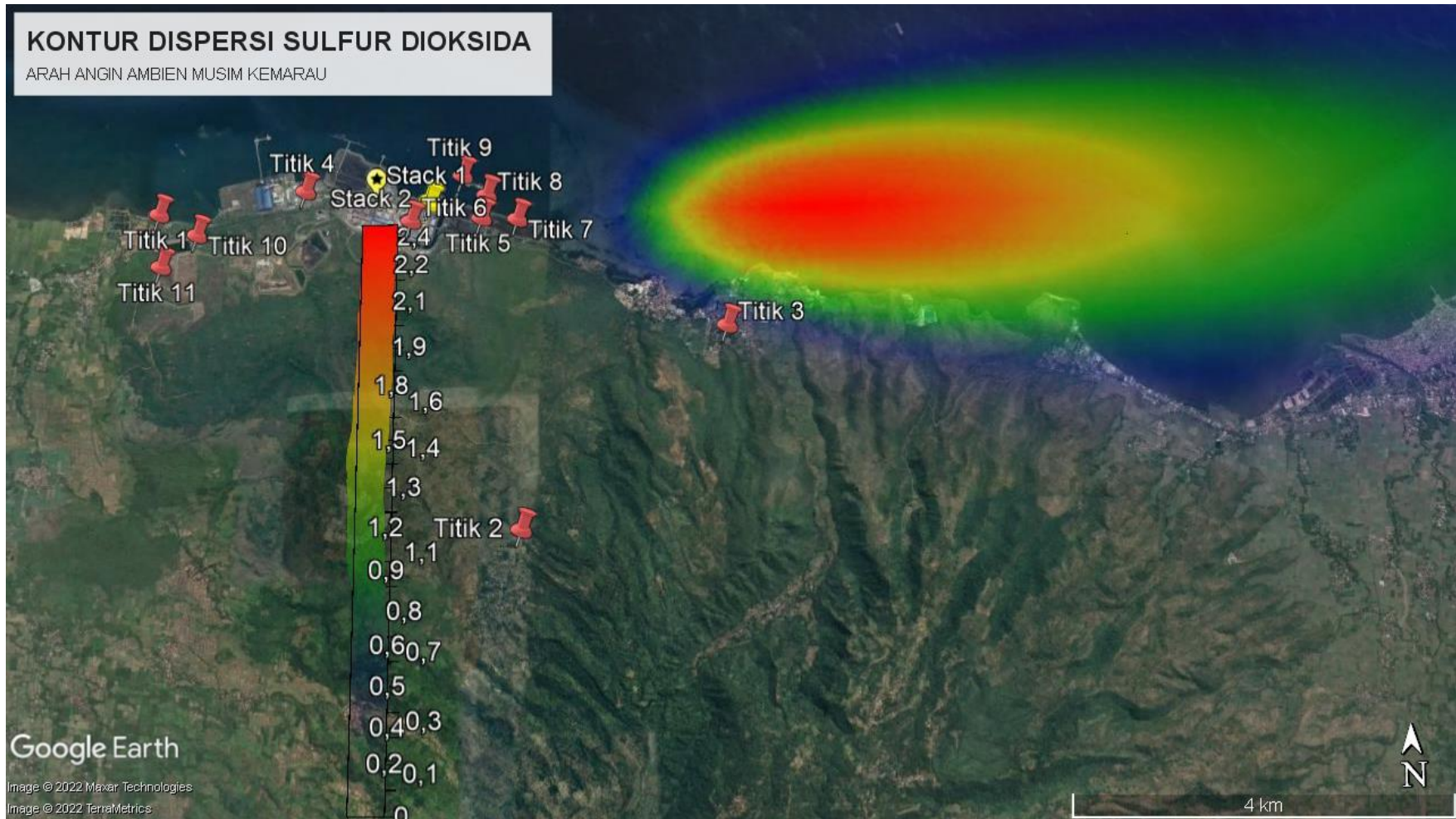
Gambar 4.38 Pola Sebaran Sulfur Dioksida Arah Angin Ambien Musim Hujan



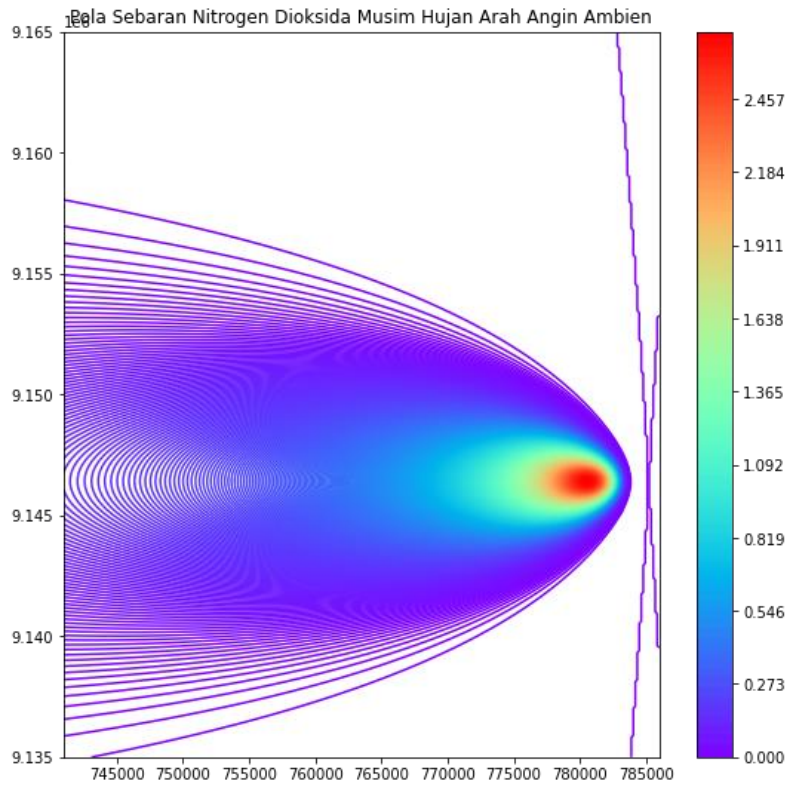
Gambar 4.39 Pola Sebaran Sulfur Dioksida Arah Angin Ambien Musim Kemarau



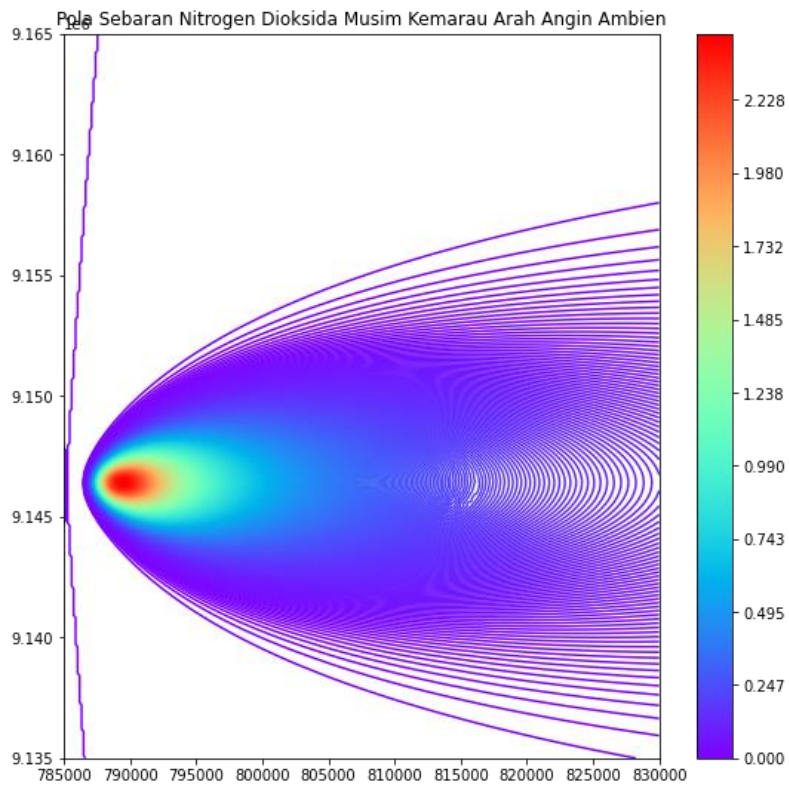
Gambar 4.40 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida Arah Angin Ambien Musim Hujan



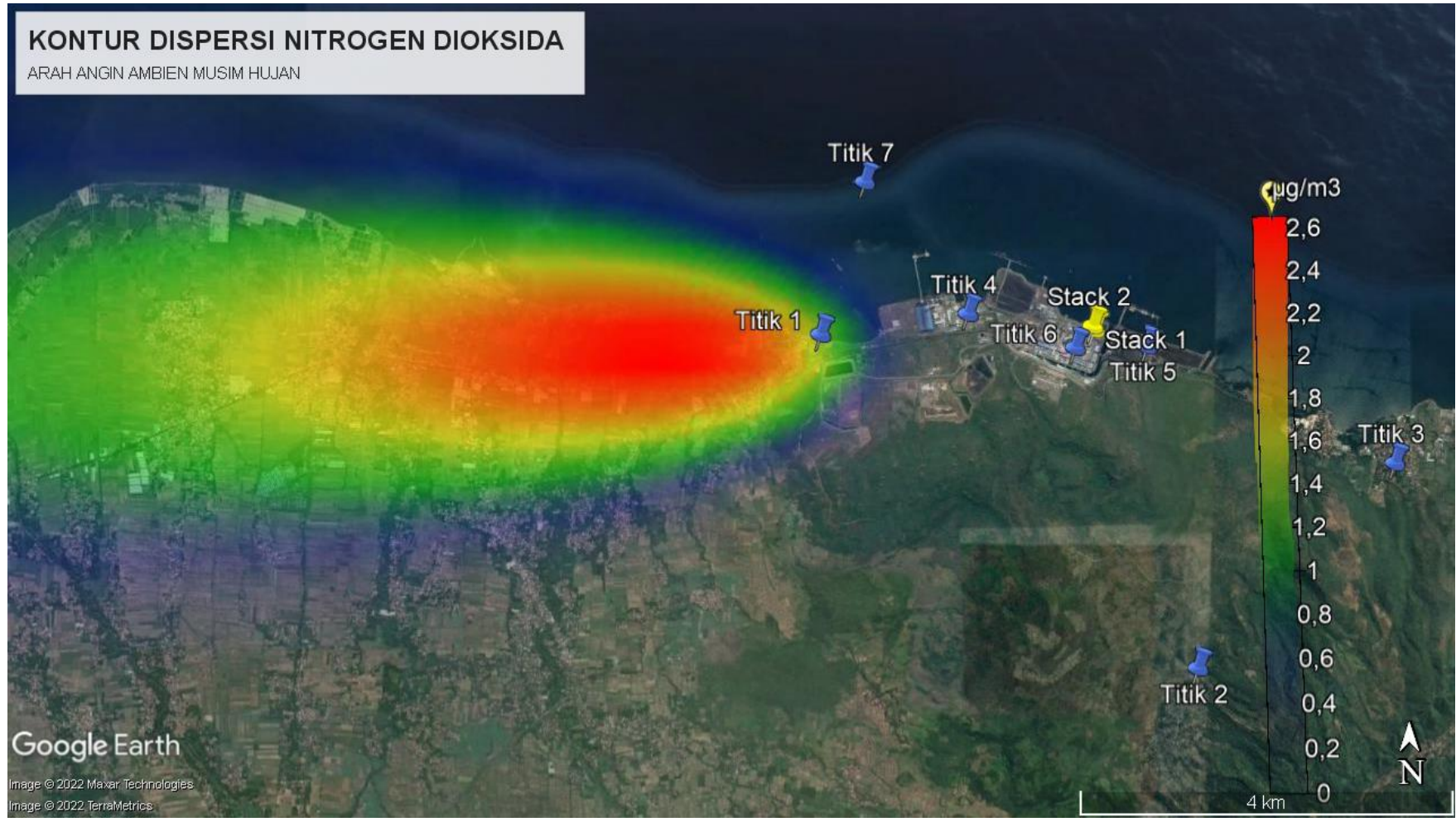
Gambar 4.41 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida Arah Angin Ambien Musim Kemarau



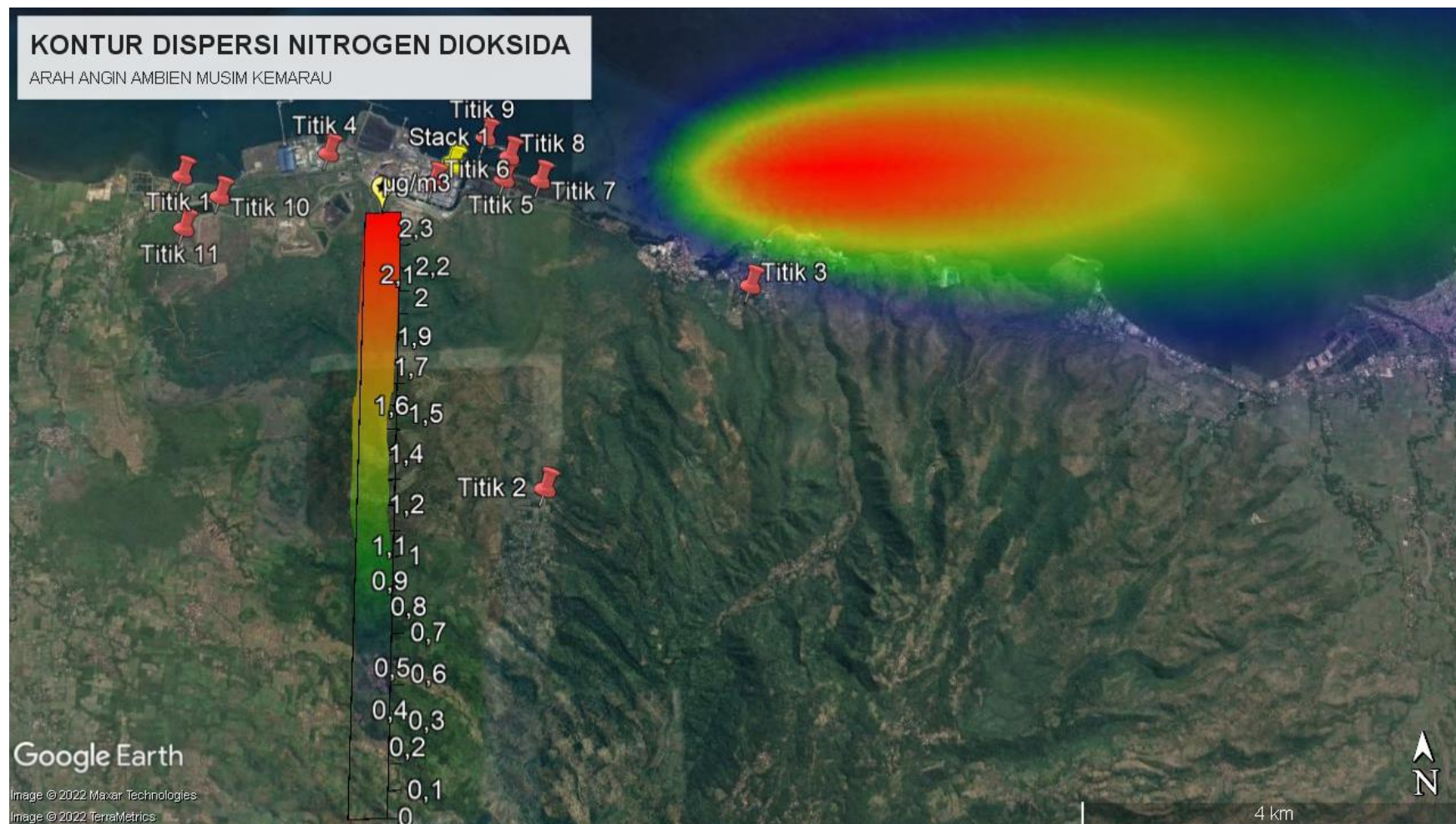
Gambar 4.42 Pola Sebaran Nitrogen Dioksida Arah Angin Ambien Musim Hujan



Gambar 4.43 Pola Sebaran Nitrogen Dioksida Arah Angin Ambien Musim Kemarau



Gambar 4.44 Kontur Dispersi Nitrogen Dioksida Arah Angin Ambien Musim Hujan



Gambar 4.45 Kontur Dispersi Nitrogen Dioksida Arah Angin Ambien Musim Kemarau

Berdasarkan 4 gambar pola sebaran di atas, didapatkan pola sebaran ke arah barat untuk musim hujan, sedangkan ke arah timur untuk musim kemarau. Kemudian, hasil kontur dapat terlihat bahwa hanya beberapa titik saja yang mengenai stasiun pengujian. Model musim hujan didapatkan bahwa hanya titik 1 saja yang mengenai pola sebaran emisi dari dua parameter, sedangkan model musim kemarau hanya hampir mengenai di titik 3. Setelah didapatkan kontur dispersi menggunakan udara angin ambien, dapat dilakukan verifikasi dengan memakai titik pemantau yang tersedia di setiap musim yang berbeda. Musim hujan memiliki 7 titik pemantau, sedangkan musim kemarau memiliki 11 titik pemantau. Akan tetapi, berdasarkan input titik koordinat titik 7 musim hujan sangat tidak masuk akal karena berada di tengah laut. Hal tersebut dimungkinkan karena ada kesalahan dalam mendata koordinat yang benar. Berikut merupakan hasil *running* pemrograman Python dengan hasil uji ambien.

Tabel 4.33 Verifikasi Model dengan Hasil Uji Ambien Sulfur Dioksida Musim Hujan

No	Stasiun Pemantau	X UTM	Y UTM	C Uji Ambien ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	C Model ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	Titik 1	782228	9146366	31	4,85E-01
2	Titik 2	786229	9142758	< 30	nan ¹
3	Titik 3	788484	9144911	32,5	nan ¹
4	Titik 4	783839	9146574	< 30	7,42E-04
5	Titik 5	785790	9146194	34	6,97E-20
6	Titik 6	785008	9146196	32,5	7,58E-100
7	Titik 7	-	-	-	-

Keterangan: ¹*not a number* (tidak terhitung)

Sumber: Data Perhitungan

Tabel 4.34 Verifikasi Model dengan Hasil Uji Ambien Sulfur Dioksida Musim Kemarau

No	Stasiun Pemantau	X UTM	Y UTM	C Uji Ambien ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	C Model ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	Titik 1	782228	9146366	< 30	nan ¹
2	Titik 2	786229	9142758	< 30	1,56E-55
3	Titik 3	788465	9144911	< 30	1,17E-01
4	Titik 4	783839	9146574	< 30	nan ¹
5	Titik 5	785790	9146194	< 30	8,41E-14
6	Titik 6	785008	9146196	35	9,62E-114
7	Titik 7	786185	9146180	< 30	4,65E-06
8	Titik 8	785844	9146470	32	3,02E-13
9	Titik 9	785578	9146702	33	4,84E-46
10	Titik 10	782656	9146115	< 30	nan ¹
11	Titik 11	782273	9145766	< 30	nan ¹

Keterangan: ¹*not a number* (tidak terhitung)

Sumber: Data Perhitungan

Tabel 4.35 Verifikasi Model dengan Hasil Uji Ambien Nitrogen Dioksida Musim Hujan

No	Stasiun Pemantau	X UTM	Y UTM	C Uji Ambien ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	C Model ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	Titik 1	782228	9146366	25,75	1,6559
2	Titik 2	786229	9142758	24,9	nan ¹
3	Titik 3	788484	9144911	25,2	nan ¹
4	Titik 4	783839	9146574	32,9	0,002642
5	Titik 5	785790	9146194	31,3	2,54E-19
6	Titik 6	785008	9146196	34,55	2,77E-99
7	Titik 7	-	-	-	-

Keterangan: ¹*not a number* (tidak terhitung)

Sumber: Data Perhitungan

Tabel 4.36 Verifikasi Model dengan Hasil Uji Ambien Nitrogen Dioksida Musim Kemarau

No	Stasiun Pemantau	X UTM	Y UTM	C Uji Ambien ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	C Model ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	Titik 1	782228	9146366	25,7	nan ¹
2	Titik 2	786229	9142758	22,6	1,69E-55
3	Titik 3	788465	9144911	22,9	0,118324
4	Titik 4	783839	9146574	26,25	nan ¹
5	Titik 5	785790	9146194	19,85	9,25E-14
6	Titik 6	785008	9146196	26,5	1,06E-128
7	Titik 7	786185	9146180	22,35	5,10E-06
8	Titik 8	785844	9146470	22,55	3,32E-13
9	Titik 9	785578	9146702	27,2	5,32E-46
10	Titik 10	782656	9146115	24,6	nan ¹
11	Titik 11	782273	9145766	22,15	nan ¹

Keterangan: ¹*not a number* (tidak terhitung)

Sumber: Data Perhitungan

Nilai C model didapatkan hasil yang bervariasi baik kecil maupun tidak terdefinisi (nan). Nilai yang tidak terdefinisi dikarenakan range (x, y) model yang kurang melebar. Namun demikian, ketika rentang (x, y) model dilebarkan akan menghasilkan nilai yang sama kecilnya seperti yang lain karena titik-titik tersebut tidak dilalui oleh pola sebaran. Untuk nilai lain yang memiliki nilai kecil, dapat terbaca dengan hasil *running* pemrograman Python karena masih memiliki satuan dalam menghitung emisi seperti x_a , y_a , σ_y , dan σ_z . Dengan demikian, dilakukan analisis untuk titik yang dilalui saja.

Uji parameter sulfur dioksida dan nitrogen dioksida di Stasiun ambien dilakukan dengan memakai metode yang berbeda. Berdasarkan data hasil uji oleh PT X, pengujian sulfur dioksida menggunakan metode SNI 7119.7:2017 dengan limit deteksi $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan nitrogen dioksida menggunakan SNI 7119.2:2017 dengan limit deteksi $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Banyak hasil pengujian sulfur dioksida di titik pengujian yang berada di bawah limit deteksi sehingga

dituliskan dalam hasil uji yaitu $< 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dengan demikian, untuk nilai yang kurang dari $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ diasumsikan bernilai $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Berdasarkan Tabel 4.33 hingga Tabel 4.36, hasil *running* pemrograman Python untuk titik 1 di musim hujan dan titik 3 di musim kemarau tidak sama dengan hasil uji ambien secara langsung. Hal tersebut memiliki banyak kemungkinan yang terjadi. Pertama adalah karena hasil model hanya sebatas perkiraan sebaran emisi yang bisa saja tidak sama dengan kondisi *real*. Akan tetapi, dapat dijadikan sebagai acuan dalam menentukan titik-titik potensial yang memiliki beban emisi tertinggi. Kedua yaitu karena adanya sumber emisi lainnya yang membuat titik Stasiun pemantau memiliki nilai yang cukup tinggi. Berdasarkan pengamatan secara langsung, terdapat cerobong PLTU lain di sekitar PT X. Hal tersebut tentunya akan mempengaruhi hasil uji ambien PT X baik di sekitar pabrik maupun luar pabrik. Namun demikian, walaupun secara akumulasi dari berbagai macam sumber emisi hasil uji ambien PT X masih di bawah baku mutu yang dipersyaratkan.

4.12 Perubahan Kondisi Atmosfer (Studi Kasus)

Indonesia memiliki 2 musim yaitu musim hujan dan kemarau. Menurut Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), cuaca diartikan sebagai kondisi atmosfer yang terjadi pada waktu dan tempat tertentu. Cuaca cenderung berubah yang dapat disebabkan oleh perubahan iklim yang terjadi karena perubahan lingkungan. Beberapa unsur dari cuaca antara lain seperti suhu, curah hujan, kondisi langit, kelembaban, angin, tekanan udara, dan titik embun (Kurniawan, 2021).

Dunia zaman sekarang terasa sekali perubahan iklim yang berdampak sangat luas pada kehidupan manusia. Salah satunya yaitu cuaca tidak menentu yang terjadi di Indonesia. Menurut Profesor Richard Tol dari Sussex University, Inggris memperkirakan dampak negatif pemanasan global akan melampaui dampak positifnya bila terjadi peningkatan suhu sampai 1,1 derajat celcius. Peningkatan suhu tersebut diprediksikan akan tercapai sebentar lagi (ditjenppi.menlhk.go.id). Dengan demikian, perlu perhitungan dengan variasi kecepatan angin pada penelitian ini untuk mengasumsikan perubahan dari salah satu unsur dari cuaca sebagai permisalan tentang adanya perubahan cuaca yang sering terjadi di Indonesia.

Pada studi kasus ini digunakan faktor perubahan kecepatan angin sebagai penerapan kemungkinan terjadi keadaan atmosfer yang berbeda dalam waktu lama maupun sesaat. Studi kasus ini dilakukan untuk parameter sulfur dioksida di musim hujan dengan arah angin dominan pada Stasiun Geofisika Pasuruan. Selain itu, tingkat radiasi matahari digunakan dengan kelas sedang/*moderate*. Kecepatan arah angin yang digunakan antara lain 2,5 m/s; 4 m/s; 5,5 m/s; dan 6,5 m/s serta ditambah dengan pembahasan sebelumnya (1,42 m/s). Penggunaan variasi kecepatan angin tersebut disesuaikan dengan *range* kecepatan angin dari tabel kelas stabilitas atmosfer pada Tabel 2.2. Selain itu, hasil yang didapat adalah seberapa pengaruh variasi kecepatan angin terhadap proses penyebaran emisi dari cerobong. Kemudian, beberapa nilai perhitungan yang lainnya disesuaikan dengan perhitungan sebelumnya seperti kecepatan alir gas, temperature gas cerobong, dan lain sebagainya.

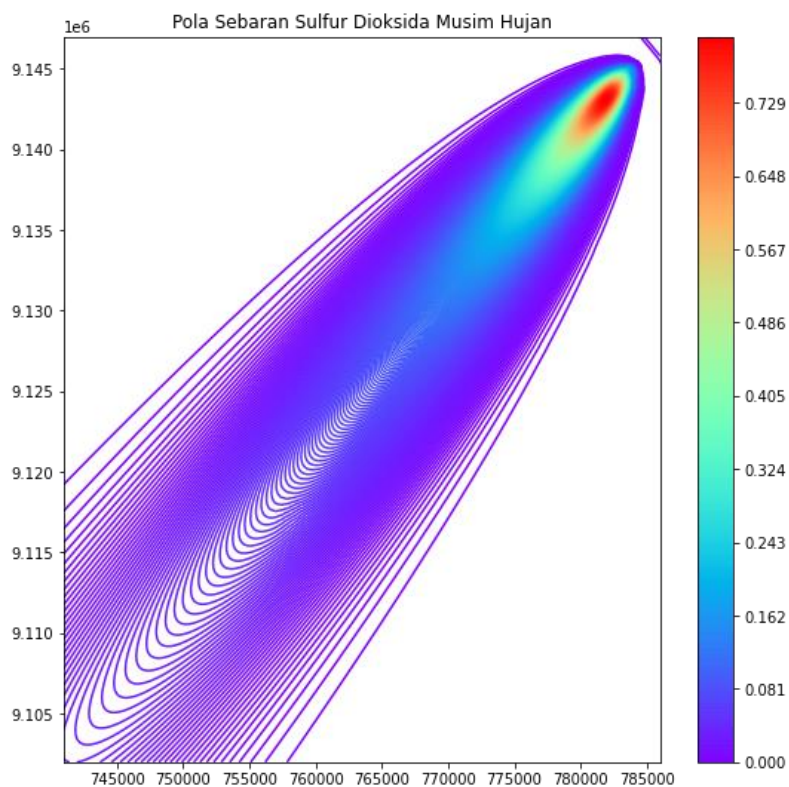
Perhitungan dimulai dengan menghitung kembali nilai *plume rise*. Hal tersebut dikarenakan kecepatan angin akan mempengaruhi kelas stabilitas atmosfer dan nilai *plume rise* yang telah diperhitungkan. Berikut merupakan penentuan kelas stabilitas atmosfer dan hasil perhitungan nilai *plume rise* dari variasi kecepatan angin yang ditentukan.

Tabel 4.37 Kelas Stabilitas Atmosfer dan Nilai *Plume Rise* dengan Variasi Kecepatan Angin

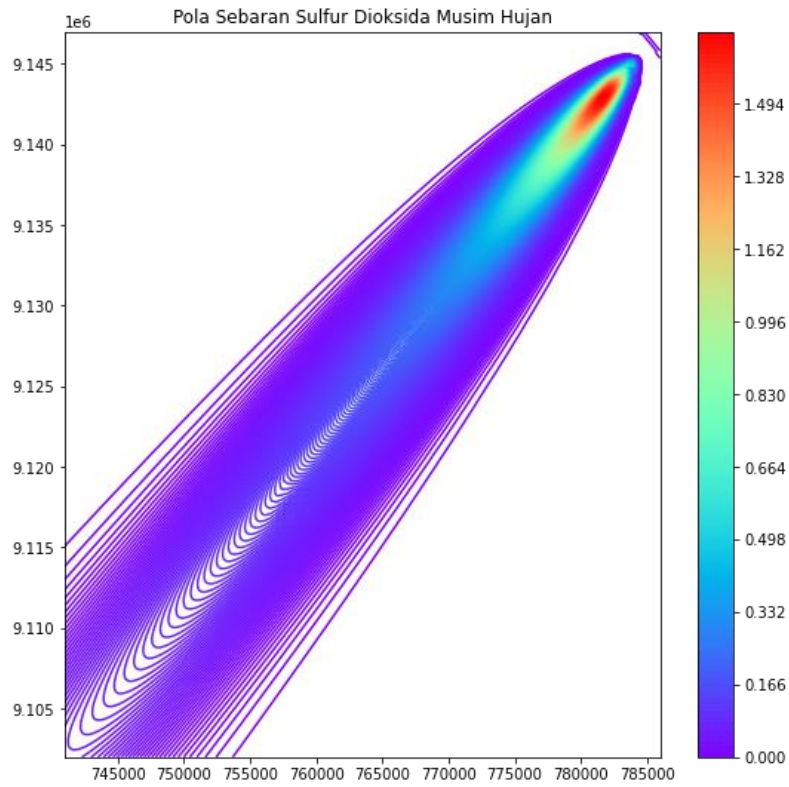
No	Kecepatan Angin (m/s)	Kelas Stabilitas	<i>Plume Rise</i> (m)	
			Cerobong 1	Cerobong 2
1	1,42	A	1219,18	1326,84
2	2,5	B	778,019	839,081
3	4	B	561,262	599,426
4	5,5	C	462,736	490,491
5	6,5	D	422,315	445,800

Sumber: Data Perhitungan

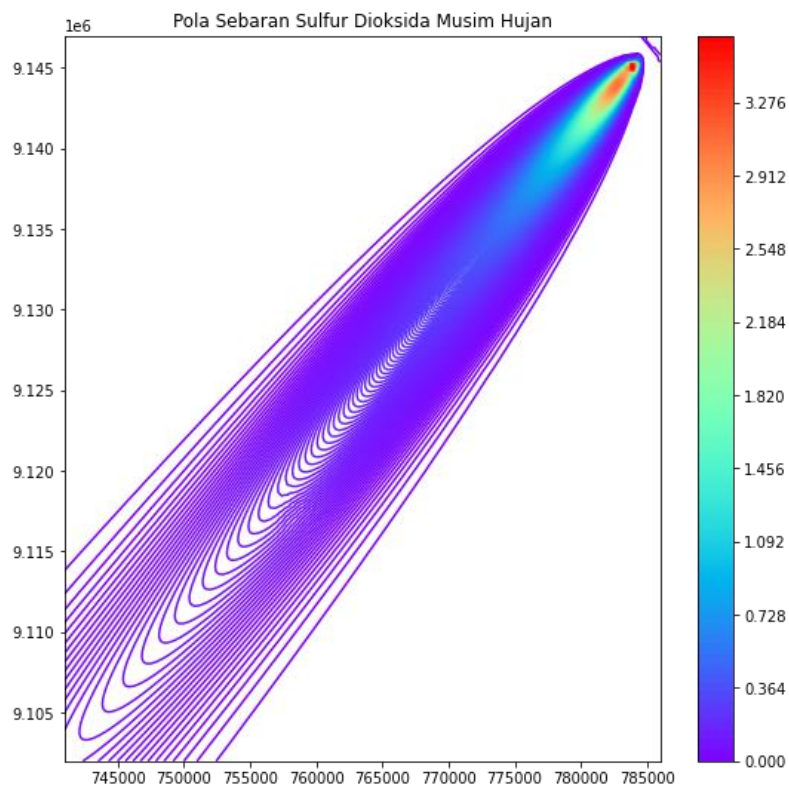
Kemudian, kelas stabilitas atmosfer dan nilai *plume rise* tersebut dimasukkan ke dalam bahasa pemrograman Python yang telah dibuat. Berikut merupakan hasil pola sebaran dan kontur dispersi dengan variasi kecepatan yang telah ditentukan.



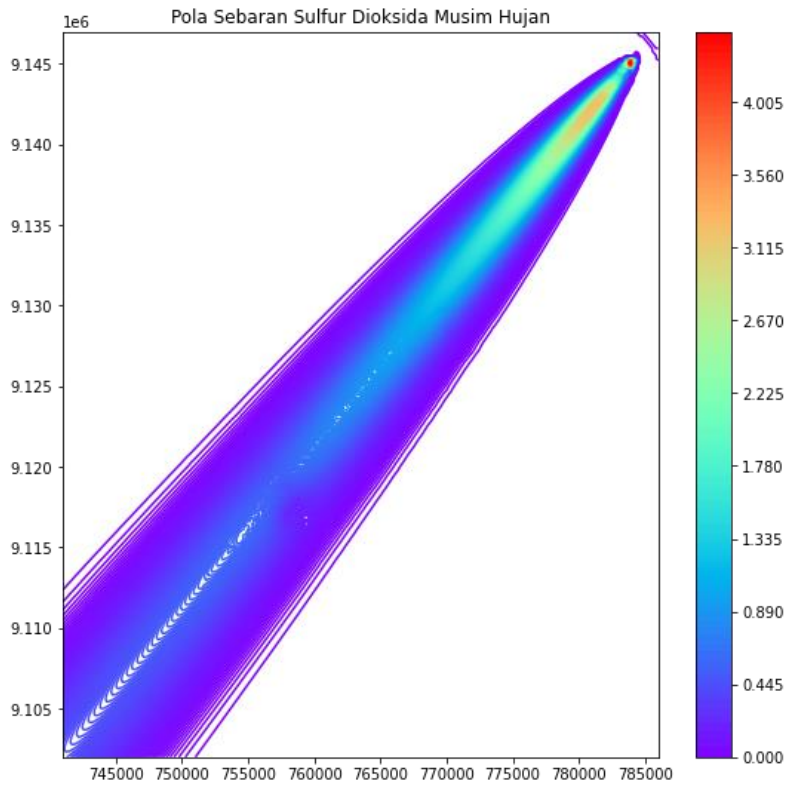
Gambar 4.46 Pola Sebaran SO₂ Musim Hujan Kecepatan Angin 1,42 m/s



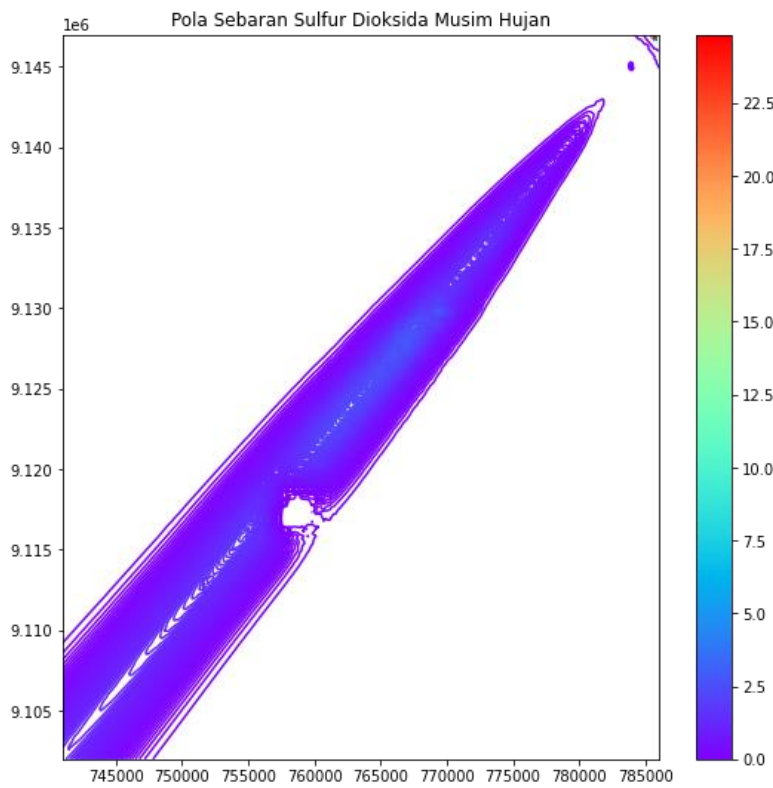
Gambar 4.47 Pola Sebaran SO₂ Musim Hujan Kecepatan Angin 2,5 m/s



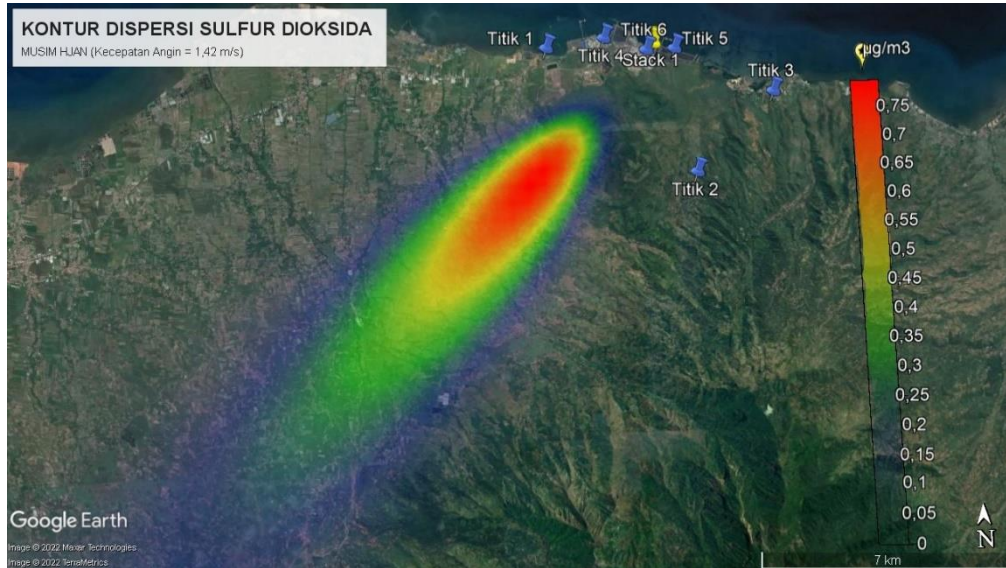
Gambar 4.48 Pola Sebaran SO₂ Musim Hujan Kecepatan Angin 4 m/s



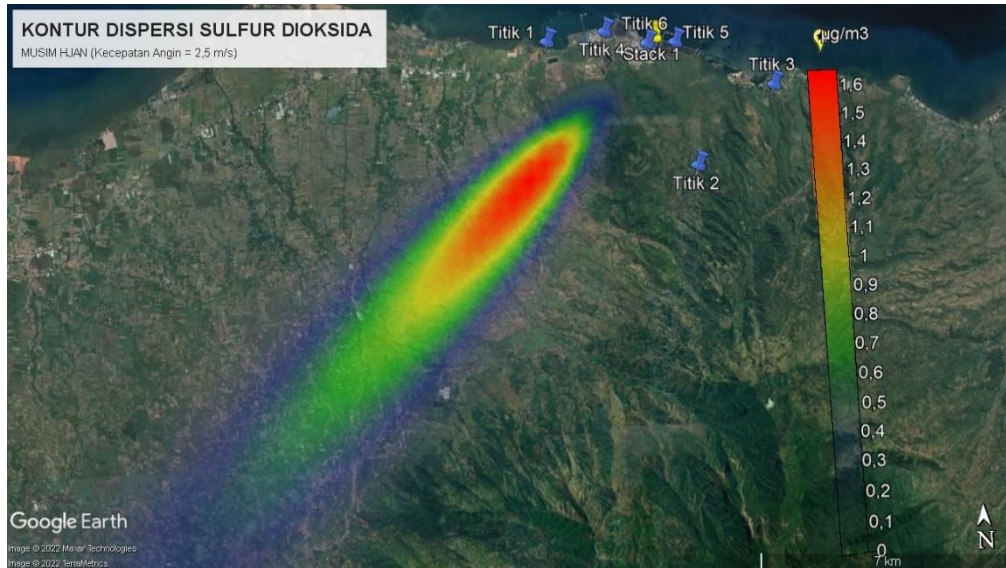
Gambar 4.49 Pola Sebaran SO₂ Musim Hujan Kecepatan Angin 5,5 m/s



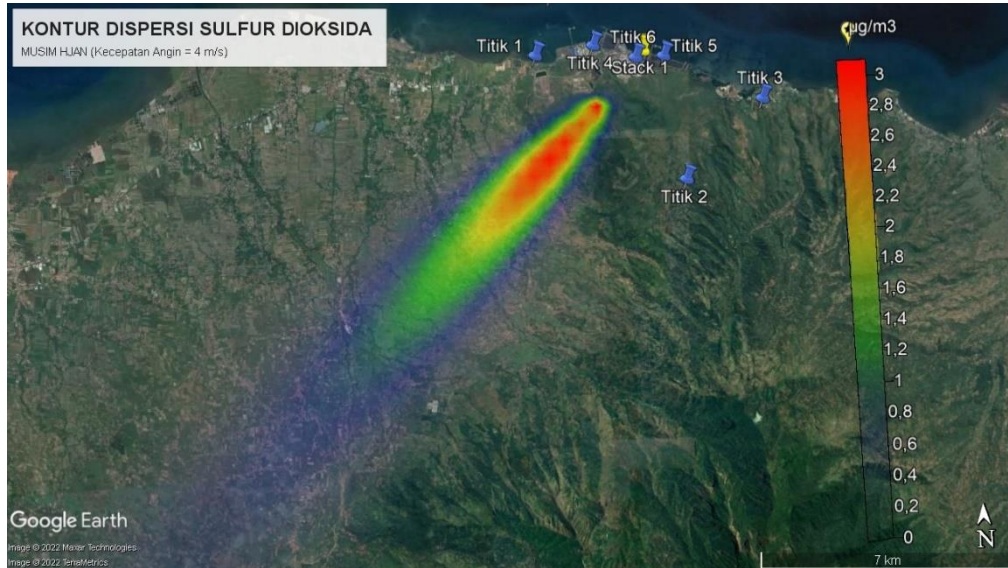
Gambar 4.50 Pola Sebaran SO₂ Musim Hujan Kecepatan Angin 6,5 m/s



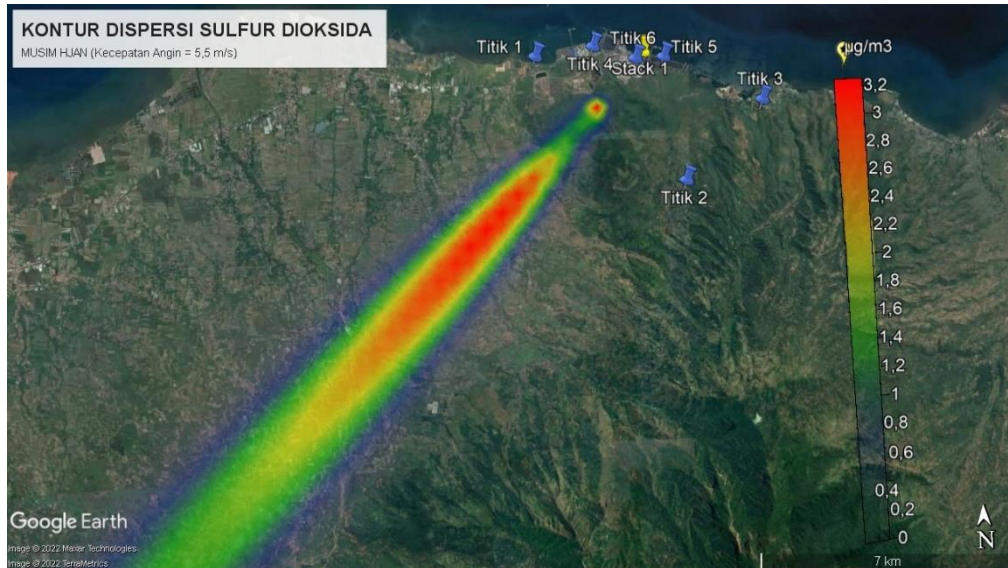
Gambar 4.51 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida di Musim Hujan (Kecepatan Angin = 1,42 m/s)



Gambar 4.52 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida di Musim Hujan (Kecepatan Angin = 2,5 m/s)



Gambar 4.53 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida di Musim Hujan (Kecepatan Angin = 4 m/s)



Gambar 4.54 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida di Musim Hujan (Kecepatan Angin = 5,5 m/s)



Gambar 4.55 Kontur Dispersi Sulfur Dioksida di Musim Hujan (Kecepatan Angin = 6,5 m/s)

Hasil *overlay* di atas didapatkan berbagai macam kesimpulan hasil dispersi dari variasi kecepatan angin. Perbedaan kecepatan angin akan menentukan kelas stabilitas atmosfer sesuai dengan Tabel 2.2. Kelas stabilitas atmosfer berpengaruh pada rumus parameter dispersi (σ_y dan σ_z). Kemudian, perbedaan rumus parameter dispersi yang digunakan dapat berpengaruh hasil perhitungan rumus konsentrasi emisi (C). Dengan demikian, perubahan kondisi atmosfer berupa kecepatan angin sangat berpengaruh dalam perhitungan dispersi emisi.

Dari Gambar 4.46 sampai Gambar 4.50 dihasilkan pola sebaran emisi dengan variasi kecepatan yang berbeda. Dengan arah angin dominan ke barat daya, emisi yang tersebar memiliki *range* tingkat konsentrasi yang berbeda. Semakin besar kecepatan angin di udara ambien selama penyebaran emisi, semakin tinggi pula *range* konsentrasi yang tersebar. Kemudian, pola sebaran yang dihasilkan semakin menyempit untuk emisi dengan konsentrasi tertinggi pada kecepatan angin yang semakin membesar. Selanjutnya, didapatkan juga gambar kontur dispersi (Gambar 4.51 sampai Gambar 4.55) yang menunjukkan gambaran secara *real* setelah di-*overlay*-kan ke *software Google Earth*. Selain itu, dari seluruh kontur dispersi di atas dominan mengenai area hijau arah barat daya PT X sampai menuju Desa Krajan, Sukorejo, Kecamatan Karanganyar, Kabupaten Probolinggo. Hal tersebut dapat dijadikan penguatan rekomendasi dalam hal pemberian titik pemantauan pada daerah tersebut Ketika sewaktu-waktu terjadi perubahan kecepatan angin.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini antara lain:

1. Sebaran emisi berupa jenis parameter yang berbeda-beda di musim hujan dan musim kemarau terpolakan ke arah barat daya dari kedua titik cerobong dengan menggunakan arah angin dominan dari Stasiun Geofisika Pasuruan.
2. Konsentrasi maksimum akumulasi sebaran 2 cerobong pada hasil kontur dispersi emisi sulfur dioksida di musim hujan adalah $0,802 \mu\text{g}/\text{m}^3$, emisi sulfur dioksida di musim kemarau adalah $2,465 \mu\text{g}/\text{m}^3$, emisi nitrogen dioksida di musim hujan adalah $2,713 \mu\text{g}/\text{m}^3$, emisi nitrogen dioksida di musim kemarau adalah $2,455 \mu\text{g}/\text{m}^3$, emisi merkuri di musim hujan adalah $5,54e^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$, dan emisi merkuri di musim kemarau adalah $6,17e^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$. Berdasarkan hasil tersebut, terdapat kesamaan titik koordinat penerima akumulasi emisi dengan konsentrasi tertinggi di musim hujan pada koordinat (781936,455 m; 9143086,957 m) dan di musim kemarau pada koordinat (782237,458 m; 9143387,96 m). Hal tersebut dikarenakan terdapat kesamaan nilai faktor sebaran emisi seperti *plume rise* dan data meteorologi lainnya. Titik penerima emisi tertinggi tepatnya berada di area hijau sebelum memasuki Desa Krajan, Sukorejo, Kec. Karanganyar, Kabupaten Probolinggo. Selain itu, emisi yang tersebar sesuai 2 model di setiap parameter tidak melebihi baku mutu ambien yang dipersyaratkan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, saran yang dapat diberikan berupa:

1. Melakukan konversi alam di area hijau sekitar PT X sebagai tindakan pencegahan dari dampaknya emisi yang tersebar.
2. Menambahkan titik pemantauan kualitas udara ambien di sekitar area hijau arah barat daya PT X hingga Desa Krajan, Sukorejo, Kecamatan Karanganyar, Kabupaten Probolinggo.
3. Melakukan penelitian lebih lanjut terkait koreksi model Gauss untuk perhitungan konsentrasi emisi dengan menggunakan data meteorologi Kabupaten Probolinggo apabila data meteorologi wilayah bersangkutan telah tersedia.
4. Melakukan penelitian lebih lanjut terkait koreksi model Gauss untuk perhitungan konsentrasi emisi dengan memperhatikan perubahan arah angin.
5. Melakukan penelitian lebih lanjut dengan visualisasi sebaran dispersi polutan 3 dimensi (x, y, z).
6. Untuk menghasilkan hasil pemodelan sebaran emisi yang lebih bervariasi dapat dilakukan perhitungan model Gauss menggunakan rumus parameter dispersi (σ_y dan σ_z) lainnya untuk dijadikan bahan perbandingan antara model yang satu dengan yang lain.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2018). Mercury Quick Facts: Health Effect of Mercury Exposure, <URL:<https://www.atsdr.cdc.gov/mercury/docs/healtheffectsmercury.pdf>>.
- Anggreni, R., Muliadi, dan Adriat, R. (2018). Analisis Pengaruh Tutupan Awan Terhadap Radiasi Matahari di Kota Pontianak. *Prisma Fisika*, 6(3), 214-219. <http://dx.doi.org/10.26418/pf.v6i3.28896>
- Arif, M.R., Afiuddin A.E., dan Ramadani T.A. (2020). Pemodelan Sebaran Emisi SO₂ dari Cerobong PLTU Paiton Unit 9 pada Musim Hujan dengan Menggunakan Model Dispersi Gauss. *National Conference Proceeding on Waste Treatment Technology*. Program Studi D4 Teknik Pengolahan Limbah. Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
- Arya, S.P. (1999). *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. Department of Marine Earth and Atmospheric. New York: North California State University.
- Assegaf, A.H. (2018). Pemodelan Dispersi gas dari Cerobong PLTU dengan Model Pasquill-Gaussian. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 8(3), 414-419. <https://doi.org/10.29244/jpsl.8.3.414-419>
- Assomadi, A.F. (2016). *Pendekatan Baru Model Distribusi Pencemar di Atmosfer Perkotaan*. Disertasi. Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- EPA. (1992). *Screening Procedure for Estimating Air Quality Impact of Stationary Source*. North Carolina: U.S EPA.
- EPA. (1995). *Screen3 Model User's Guide*. North Carolina: U.S EPA.
- Halulanga, A.J., Rosdiana, R., dan Adami, A. (2021). Uji Kandungan Gas Sulfur Dioksida (SO₂) pada Udara Ambien Akibat Adanya Pembakaran Batubara PLTU Nii Tanasa, Sulawesi Tenggara. *Jurnal Teknik*, 1(2), 5-10. <https://doi.org/10.51454/teluk.v1i2.382>
- Jannah, A.N. dan Sudarti. (2016). Hubungan Perubahan Cuaca dengan Indeks Kecerahan Matahari, Suhu Lingkungan dan Kelembapan Udara di Desa Karanganyar. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Terapannya*, 4(1), 27-32. <https://doi.org/10.46918/karst.v4i1>
- Karomah, B. dan Wilaha L. (2019). Pemodelan Matematika Tentang Penyebaran Nitrogen Dioksida (NO₂) Akibat Proses Industri Sebuah Pabrik. *Seminar Nasional Edusainstek. FMIPA UNIMUS*.
- Keputusan Kepala Badan Pengendalian Dampak Lingkungan Nomor: KEP-107/KABAPEDAL/11/1997. *Pedoman Teknis Perhitungan dan Pelaporan Serta Informasi Indeks Standa Pencemar Udara*. Badan Pengendalian Dampak Lingkungan.
- Koehn, A.C. (2013). *Comparison of Atmospheric Stability Method for Calculating Ammonia and Methane Emission Rates with Windtrax*. American Society of Agriculture and Biological Engineer. ISSN 2151-0032.
- Kurniawan, A. (2021). Contoh Perubahan Cuaca beserta Penjelasannya, Ketahui Perbedaannya dengan Iklim, <https://www.merdeka.com/jabar/contoh-perubahan-cuaca-beserta-penjelasannya-ketahui-perbedaannya-dengan-iklim-klm.html>, diakses pada 19 Juli 2022 pukul 22.48.
- Macdonald, R. (2003). *Theory and Objectives of Air Dispersion Modelling*. Waterloo: Department of Mechanical Engineering. University of Waterloo.
- MAESTRO. (2010). *Apa Itu Google Earth ?*, <https://maestro.unud.ac.id/apa-itu-google-earth/>, diakses pada 19 Juli 2022 pukul 21.32.

- Magidi, S. (2013). Determining The Atmospheric Stability Classes for Mazoe in Northern Zimbabwe. *International Journal of Engineering Research and Application*, 3(2), 178-181.
- Mukhtar, R., Lahtiani S., Hamonangan E., Wahyudi H., Santoso M., dan Lestiani D.D. (2014). Kajian Baku Mutu Logam Berat di Udara Ambien Sebagai Bahan Masukan Lampiran PP 41/1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara, 8(1), 1-52. <https://doi.org/10.20886/jklh.2014.8.1.32-42>
- Muklis. (2009). *Hukum Administrasi Lingkungan*. Jakarta: Setara Press.
- Munirwansyah, Sundary D., Nugraha G. S. (2013). Interpretasi *Bearing Layer* (Kontur Lapisan Tanah Keras) di Bawah Permukaan dengan Program Surfer. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala*, 2(3), 269-280.
- Nauli, T. (2002). Pola Sebaran Polutan dari Cerobong Asap. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir P3TM-BATAN, 27 Juni 2022. Yogyakarta.
- Newman, J. F. & Klein P.M. (2014). The Impacts of Atmospheric Stability on The Accuracy of Wind Speed Extrapolation Methods. *Resources*, 3(1), 81-105. <https://doi.org/10.3390/resources3010081>
- Nurunnizar, A.A. (2020). Pemodelan Dispersi Polutan Debu (Model Gaussian Plume) sebagai Acuan Pemantauan Kualitas Udara Ambien, <URL: <https://studikhusus1.wordpress.com/2020/05/13/pemodelan-sebaran-polutan-model-gaussian-plume-sebagai-acuan-pemantauan-kualitas-udara-ambien/>>
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*. New York: Methuen Co.
- Palit, H.B., Poekoel V., dan Patras L.S. (2017). Simulasi dan Pengontrolan Sistem Pembuangan Abu di PLTU 2 Sulawesi Utara. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 6(3), 123-132. doi.org/10.35793/jtek.6.3.2017.18810
- Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 10 Tahun 2009. Baku Mutu Udara Ambien dan Emisi Sumber Tidak Bergerak di Jawa Timur. Gubernur Jawa Timur.
- Peraturan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 15 Tahun 2019. Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal. Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021. Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Presiden Republik Indonesia.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999. Pengendalian Pencemaran Udara. Presiden Republik Indonesia.
- Pratomo, S.A. (2019). Penentuan Kadar Sulfur Dioksida (SO₂), Nitrogen Dioksida (NO₂), Oksidan (O₃), dan Amonia (NH₃) Udara Ambien di Balai Hiperkes dan Keselamatan Kerja Yogyakarta. Universitas Islam Indonesia.
- Puspitasari, A.D. (2011). Pola Spasial Pencemaran Udara dari Sumber Pencemar PLTU dan PLTGU Muara Karang. Skripsi. Depok, Indonesia: Universitas Indonesia.
- Qipra Galang Kualita. (2007). *Memprakirakan Dampak Lingkungan Kualitas Udara*. Deputi Bidang Tata Lingkungan – Kementerian Lingkungan Hidup.
- Rahmadhani, A. (2017). *Pemodelan Dispersi Pencemaran Udara Sumber Majemuk Industri Semen di Kabupaten Tuban Jawa Timur*. Skripsi. Surabaya: ITS.
- Rahman, A. dan Marampa, W.G. (2017). Analisis Pengaruh Batu Kapur Terhadap Penurunan Kadar Sulfur Dioksida Gas Buang Boiler pada PT PLN (PERSERO) Unit PLTU Barru. *Sinergi*, 15(1), 76-83.
- Rahmawati, F. (1999). *Kualitas Udara di DKI Jakarta Tahun 1997*. Depok: Jurusan Geografi FMIPA Universitas Indonesia.

- Rao, M. and George, L.A. (2014). Using the NO₂/NO_x Ratio to Understand the Spatial Heterogeneity of Secondary Pollutant Formation Capacity in Urban Atmosphere. AGU Fall Meeting Abstracts. A33F-3265.
- Razi, K.M.H.A. and Hiroshi, M. (2012). Modeling of Atmospheric Dispersion of Mercury from Coal-Fired Power Plants in Japan. *Atmospheric Pollution Research*, 3(2), 226-237. <https://doi.org/10.5094/APR.2012.025>
- Ruhiat, Y. (2008). Model Prediksi Distribusi Laju Penyebaran Sulfur Dioksida dan Debu dari Kawasan Industri (Studi Kasus di Kota Cirebon). Skripsi. Bogor: IPB.
- Sabin, T.J., Bailer-Jones, and Withers, P.J. (2000). Accelerated Learning Using Gaussian Process Models to Predict Static Recrystallization in an Al-Mg Alloy. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 8, 687-706.
- Sasmita, A., Andrio, D., dan Nopita, R. (2021). Dispersi SO₂ dan NO₂ dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap Tembilahan, Riau. *Jurnal Envirotek*, 13(2), 98-107. <https://doi.org/10.33005/envirotek.v13i2.162>
- Sulaiman, A. dan Sadly, M. 2014. Pemodelan Dispersi Gaussian Menggunakan Metode Transformasi Laplace dan Intergrasi dengan Citra Satelit Google Earth. *Jurnal Teknologi Lingkungan BPPT*, 15(2), 59-64. <https://doi.org/10.29122/jtl.v15i2.1597>.
- Suryono, D.D. dan Pujilestari, E.S. (2019). Prediksi Jalur (Pathway) Logam Merkuri dari Batubara Kegiatan PLTU di Teluk Palabuanratu dengan Pendekatan Sistem Dinamis. *J. Segara*, 15(3), 179-193. <http://dx.doi.org/10.15578/segara.v15i3.6708>
- Syahrudin, A.N. dan Kurniawan, T. (2018). Input dan Output pada Bahasa Pemrograman Python. *Jurnal Dasar Pemrograman Python STMIK*: 1-7.
- Visscher, A.D. (2014). *Air Dispersion Modeling Foundations and Applications*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Yulinawati, H., Zulaiha, S., Pristianty, R., dan Siami, L. (2019). Kontribusi Metropolitan terhadap Polutan Udara Berbahaya Timbal dan Merkuri dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Batubara). *Prosiding Seminar Nasional Pembangunan Wilayah dan Kota Berkelanjutan*. Universitas Trisakti.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN 1

SCRIPT BAHASA PEMROGRAMAN PYTHON

```
! pip install utm

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import math
import pandas as pd
import utm
import urllib.request
import json

from math import pi
from scipy.interpolate import griddata

# dictionary untuk menyimpan kategori2 stabilitas atmosfer
stb_categories = {
    1: {
        'day': {
            'strong': 'A',
            'moderate': 'A',
            'slight': 'B'
        },
        'night': {
            'low_cloud': 'E',
            '3/4_cloud': 'F'
        }
    },
    2: {
        'day': {
            'strong': 'A',
            'moderate': 'B',
            'slight': 'C'
        },
        'night': {
            'low_cloud': 'E',
            '3/4_cloud': 'F'
        }
    },
    3: {
        'day': {
            'strong': 'B',
            'moderate': 'B',
            'slight': 'C'
        },
    },
```

```

        'night': {
            'low_cloud': 'D',
            '3/4_cloud': 'E'
        }
    },
    4: {
        'day': {
            'strong': 'C',
            'moderate': 'C',
            'slight': 'D'
        },
        'night': {
            'low_cloud': 'D',
            '3/4_cloud': 'D'
        }
    },
    5: {
        'day': {
            'strong': 'C',
            'moderate': 'D',
            'slight': 'D'
        },
        'night': {
            'low_cloud': 'D',
            '3/4_cloud': 'D'
        }
    }
}

# fungsi untuk menghitung konsentrasi
def concentrate(xgrid, ygrid, x, y, z, Q, ws, H, dir, time, condition):

    aa = (90 - dir)*pi/180

    ws_cat = wind_speed_cat(u)

    stb = stb_categories[ws_cat][time][condition]

    xa = (xgrid - x)*math.cos(aa) - (y - ygrid)*math.sin(aa)
    ya = (ygrid - y)*math.cos(aa) + (x - xgrid)*math.sin(aa)

    xa = np.round(xa, decimals = 3)
    ya = np.round(ya, decimals = 3)

    if stb == 'A':
        dy = 0.22*xa*((1+(0.0001*xa))**(-1/2))
        dz = 0.2*xa

```

```

elif stb == 'B':
    dy = 0.16*xa*((1+(0.0001*xa))**(-1/2))
    dz = 0.12*xa
elif stb == 'C':
    dy = 0.11*xa*((1+(0.0001*xa))**(-1/2))
    dz = 0.08*xa*((1+(0.0002*xa))**(-1/2))
elif stb == 'D':
    dy = 0.08*xa*((1+(0.0001*xa))**(-1/2))
    dz = 0.06*xa*((1+(0.0015*xa))**(-1/2))
elif stb == 'E':
    dy = 0.06*xa*((1+(0.0001*xa))**(-1/2))
    dz = 0.03*xa*((1+(0.0003*xa))**(-1))
elif stb == 'F':
    dy = 0.04*xa*((1+(0.0001*xa))**(-1/2))
    dz = 0.016*xa*((1+(0.0003*xa))**(-1))

C = (Q/(2*pi*dy*dz*ws))*np.exp(-0.5*(ya/dy)**2)*(np.exp(-(z -
H)**2)/(2*dz**2)) + np.exp(-(z +
H)**2)/(2*(dz**2))) * 1000000

return C, xa, ya, dy, dz

# fungsi untuk mendapatkan kategori arah angin
def wind_speed_cat(u):
    if u < 2:
        ws_cat = 1
    elif u >= 2 and u < 3:
        ws_cat = 2
    elif u >= 3 and u < 5:
        ws_cat = 3
    elif u >= 5 and u < 6:
        ws_cat = 4
    elif u >= 6:
        ws_cat = 5
    else :
        print('[ERROR] Mohon cek parameternya kembali')

    return ws_cat

# fungsi untuk mengubah koordinat UTM menjadi latitude dan longitude
def to_latlon(x, y):
    latlon = utm.to_latlon(x, y, 49, northern=False)
    return latlon[0], latlon[1]

# fungsi untuk mendapatkan nilai elevasi tanah
def get_elevation(lat, lon):

    lat_list = lat.flatten()

```



```

lon_list = lon.flatten()

elev_list= []

index = 0                # indeks awal
step = 1000             # kelipatan 1000

# lakukan perulangan sebanyak 90 kali, setiap perulangan ambil 1000
data elevasi (total 90000, sesuai panjang xgrid dan ygrid)
for i in range(90):

    loc_array = [{}]*step

    # buat JSON
    for i in range(step):
        loc_array[i] = {"latitude": lat_list[index + i], "longitude
": lon_list[index + i]}
        location = {"locations": loc_array}
        json_data = json.dumps(location, skipkeys=int).encode('utf8')

        # kirim request ke open-elevation.com
        url = "https://api.open-elevation.com/api/v1/lookup"
        response = urllib.request.Request(url, json_data, headers={'Con
tent-Type': 'application/json'})
        fp = urllib.request.urlopen(response)

        # proses hasil request
        res_byte = fp.read()
        res_str = res_byte.decode("utf8")
        js_str = json.loads(res_str)
        fp.close()

        # ambil nilai elevasinya
        response_len = len(js_str['results'])
        for j in range(response_len):
            elev_list.append(js_str['results'][j]['elevation'])

    index = index + step

elev = np.reshape(elev_list, (300, 300))

return elev

# fungsi untuk mendapatkan nilai konsentrasi di suatu titik
def get_concentration(x, y, C, x_test, y_test):
    points = np.array((x.flatten(), y.flatten())).T
    values = C.flatten()

```

```

    result = griddata(points, values, (x_test, y_test))

    return result

print("Dispersi Gaussian single Point Calculation: receptor in ground,
z = 1.5")
print("The General Formulation; specific for atmospheric stability: A")
print("C(x,0,0,H,u) = (Q/2.phi.dy.dz.ws) (exp(-y^2/2dy^2)) (exp(-((z-
H)^2)/(2*dz^2))+exp(-((z+H)^2/(2*dz^2))))")
print()

# stb = input("masukkan kekuatan radiasi (strong/moderate/slight): ")
# print()

dir = 225          # nilai arah angin rata-rata (derajat, north = 0)
u = 1.62          # kecepatan angin (m/s)
time = 'day'      # stabilitas atmosfer (strong/moderate/slight)
condition = 'moderate'

H1 = 1107.14
q1 = 192.407
x1 = 785221
y1 = 9146391
ws1 = 25.9

H2 = 1273.18
q2 = 159.120
x2 = 785206
y2 = 9146431
ws2 = 26.3

# z = 1.5

x, y = np.mgrid[776000:786000:300j, 9138000:9148000:300j]
x = np.round(x, decimals = 3)
y = np.round(y, decimals = 3)

lat, lon = to_latlon(x, y)

Zc = get_elevation(lat, lon)
Z = 6
z = Zc - Z - 1.5

x, y = np.mgrid[776000:786000:300j, 9138000:9148000:300j]
x = np.round(x, decimals = 3)
y = np.round(y, decimals = 3)

```

```

C1 = concentrate(x, y, x1, y1, z, q1, ws1, H1, dir, time, condition)
C2 = concentrate(x, y, x2, y2, z, q2, ws2, H2, dir, time, condition)

C = C1 + C2

print(C)

data = {"X_lon":lon.flatten(), "Y_lat":lat.flatten(), "x_utm":np.ndarra
y.flatten(x), "y_utm":np.ndarray.flatten(y), "Zc":np.ndarray.flatten(Zc
), "dy1":np.ndarray.flatten(dy1), "dz1":np.ndarray.flatten(dz1), "xa1":
np.ndarray.flatten(xa1), "ya1":np.ndarray.flatten(ya1), "C1":np.ndarray
.flatten(C1), "dy2":np.ndarray.flatten(dy2), "dz2":np.ndarray.flatten(d
z2), "xa2":np.ndarray.flatten(xa2), "ya2":np.ndarray.flatten(ya2), "C2"
:np.ndarray.flatten(C2), "C":np.ndarray.flatten(C)}

df = pd.DataFrame(data)

#df.head(25)
df.describe()

file_name = 'datasulfurdioksidakemarau.xlsx'
df.to_excel(file_name)

plt.figure(figsize=(15,15))
plt.title('Kontur Dispersi Sulfur Dioksida Musim Kemarau')
contours = plt.contourf(x, y, C, 1000, cmap='rainbow')
plt.colorbar()
ax = plt.gca()
plt.show()

plt.figure(figsize=(15,15))
plt.title('Pola Sebaran Sulfur Dioksida Musim Kemarau')
contours = plt.contour(x, y, C, 1000, cmap='rainbow')
plt.colorbar()
ax = plt.gca()
plt.show()

plt.figure(figsize=(15,10))
plt.plot(xa1, C1, color='lightcoral')
plt.title('Konsentrasi Sulfur Dioksida Musim Kemarau vs Jarak Downwind
di Cerobong 1')
plt.xlim(xmin=0)
plt.xlabel('Jarak searah angin (m)')
plt.ylabel('Konsentrasi (µg/m3)')
plt.legend(['Konsentrasi Sulfur Dioksida'])

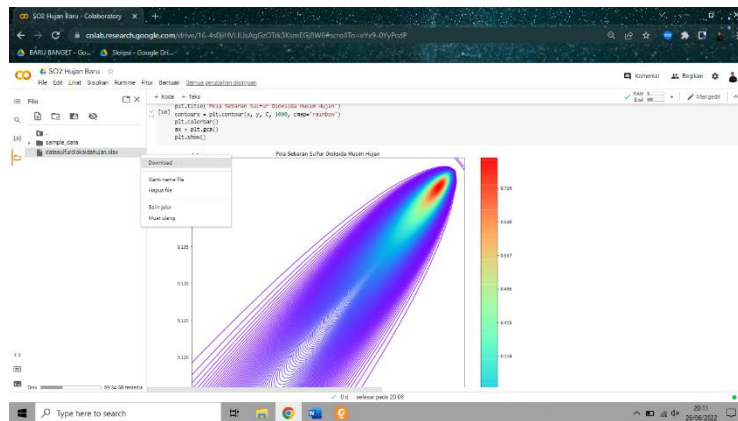
plt.figure(figsize=(15,10))
plt.plot(xa2, C2, color='#4b0082')

```

```
plt.title('Konsentrasi Sulfur Dioksida Musim Kemarau vs Jarak Downwind  
di Cerobong 2')  
plt.xlim(xmin=0)  
plt.xlabel('Jarak searah angin (m)')  
plt.ylabel('Konsentrasi ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )')  
plt.legend(['Konsentrasi Sulfur Dioksida'])
```

Halaman ini sengaja dikosongkan

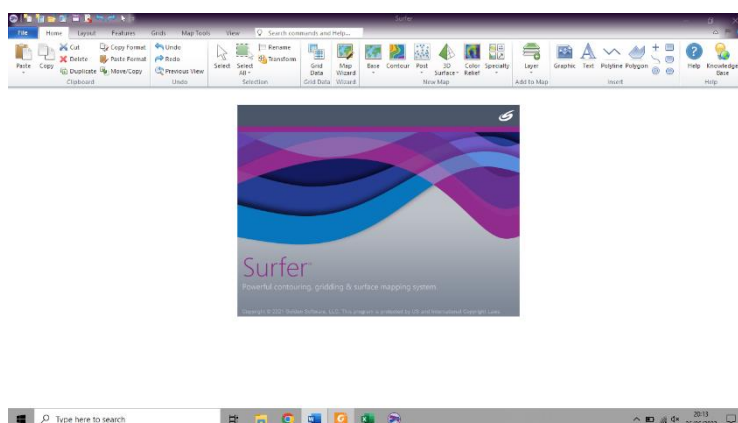
4. Mengunduh keseluruhan data yang telah diolah oleh Python dalam bentuk excel.



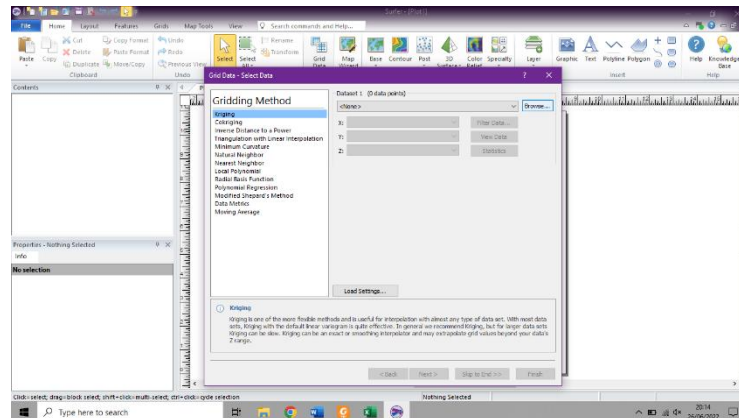
5. Membuka file excel tersebut untuk memastikan kelengkapan data yang dibutuhkan untuk pembuatan kontur dispersi.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1		X _{utm}	Y _{utm}	X _{utm}	Y _{utm}	Z _e	d _{1x}	d _{1y}	d _{1z}	d _{2x}	d _{2y}	d _{2z}	d _{3x}	d _{3y}	d _{3z}	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
2	0	113.1871	-8.11671	741000	9102100	84	5113.969	12951.63	62608.15	1202.08	0.012483	5114.789	12953.36	62679.82	159.099	0.022413	0.024896		
3	1	113.1871	-8.11671	741000	9102151	84	5109.026	12510.35	62551.73	13.787	0.01252	5109.847	12513.88	62569.4	52.678	0.022451	0.024971		
4	2	113.1871	-8.11534	741000	9102301	99	5104.079	12489.06	62445.31	-92.633	0.012551	5104.901	12492.6	62462.98	-53.742	0.022484	0.025035		
5	3	113.187	-8.11398	741000	9102452	101	5099.217	12467.78	62338.88	-199.054	0.012577	5099.95	12471.31	62356.56	-160.163	0.022511	0.025088		
6	4	113.187	-8.11262	741000	9102602	101	5094.17	12446.49	62232.46	-305.475	0.012597	5094.994	12455.03	62250.14	-266.584	0.022534	0.025131		
7	5	113.187	-8.11126	741000	9102753	90	5089.209	12425.21	62126.04	-411.895	0.012613	5090.034	12438.74	62143.72	-373.004	0.022551	0.025163		
8	6	113.187	-8.1099	741000	9102903	93	5084.244	12403.92	62019.62	-518.316	0.012622	5085.069	12422.46	62037.3	-479.425	0.022562	0.025184		
9	7	113.187	-8.10854	741000	9103054	93	5079.274	12382.64	61913.2	-624.737	0.012626	5080.1	12386.18	61930.88	-585.846	0.022568	0.025194		
10	8	113.187	-8.10718	741000	9103204	102	5074.299	12361.36	61806.78	-731.158	0.012624	5075.326	12364.89	61824.46	-692.267	0.022568	0.025193		
11	9	113.187	-8.10582	741000	9103355	99	5069.32	12340.07	61700.36	-837.579	0.012617	5070.147	12343.61	61718.04	-798.688	0.022563	0.02518		
12	10	113.187	-8.10446	741000	9103505	99	5064.336	12318.79	61593.94	-944	0.012604	5065.164	12322.32	61611.62	-905.109	0.022552	0.025156		
13	11	113.187	-8.1031	741000	9103656	97	5059.348	12297.5	61487.52	-1050.42	0.012585	5060.177	12301.04	61505.2	-1011.53	0.022536	0.025121		
14	12	113.187	-8.10174	741000	9103806	94	5054.355	12276.22	61381.11	-1156.84	0.012561	5055.184	12279.76	61398.78	-1117.95	0.022519	0.025074		
15	13	113.187	-8.10038	741000	9103957	94	5049.357	12254.94	61274.68	-1263.26	0.012531	5050.188	12258.47	61292.35	-1224.37	0.022486	0.025016		
16	14	113.187	-8.09902	741000	9104107	97	5044.355	12233.65	61168.26	-1369.68	0.012495	5045.186	12237.19	61185.93	-1330.79	0.022452	0.024947		
17	15	113.187	-8.09766	741000	9104258	101	5039.348	12212.37	61061.84	-1476.1	0.012451	5040.18	12215.9	61079.51	-1437.21	0.022413	0.024866		
18	16	113.187	-8.0963	741000	9104408	101	5034.336	12191.08	60955.41	-1582.52	0.012407	5035.169	12194.62	60973.09	-1543.63	0.022368	0.024775		
19	17	113.1869	-8.09494	741000	9104559	108	5029.32	12169.8	60848.99	-1688.94	0.012354	5030.153	12173.33	60866.67	-1650.05	0.022317	0.024671		
20	18	113.1869	-8.09358	741000	9104709	170	5024.306	12148.51	60743.47	-1794.37	0.012304	5025.133	12152.06	60784.35	-1716.47	0.022261	0.024567		

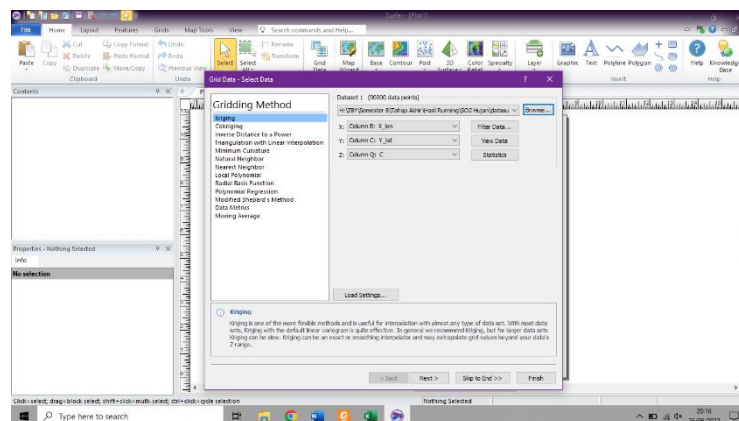
6. Membuka software Surfer 22 sebagai penerjemah file tersebut.



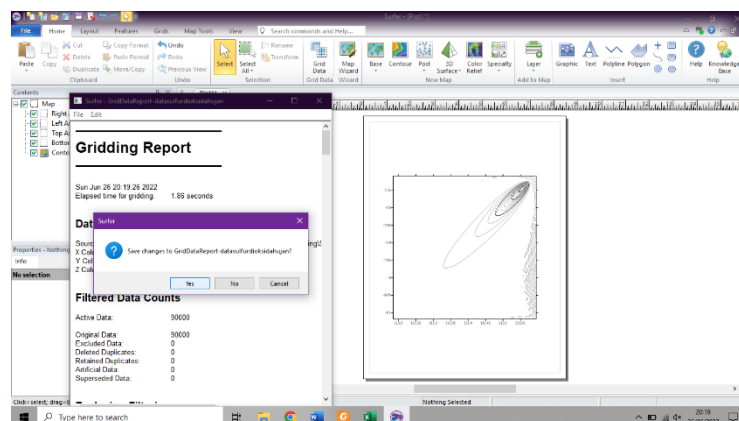
- Memilih opsi *grid* data pada tab *home*, lalu melakukan pencarian file excel tersebut dengan *tool browse*.



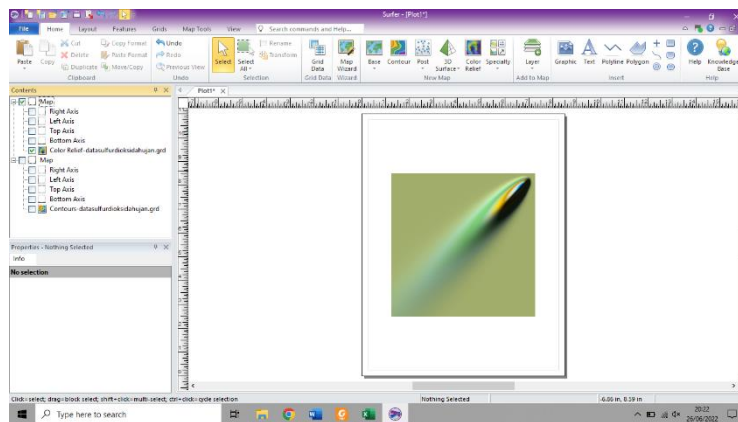
- Memilih kolom dari hasil *running* pemrograman Python untuk axis-X menggunakan kolom *X_lon* (koordinat longitude), axis-Y menggunakan kolom *Y_lat* (koordinat latitude), dan axis-Z menggunakan kolom *C* (akumulasi emisi dari kedua cerobong). Kemudian, langsung menekan tombol *finish* untuk diproses.



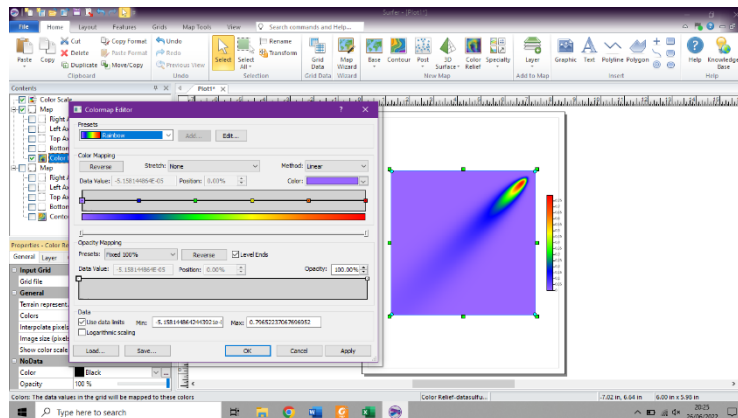
- Menyimpan hasil *grid* data, lalu membukanya kembali melalui opsi *File > Open*.



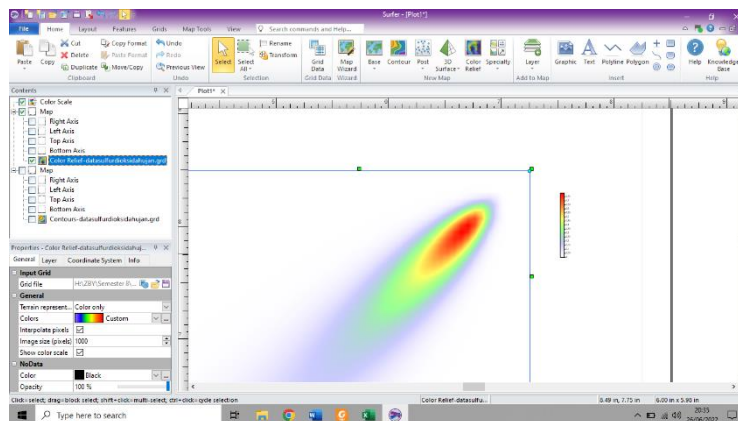
- Men-*unchecklist* beberapa petunjuk axis agar kontur yang dihasilkan tidak terlalu ramai dengan angka petunjuk koordinat dan hanya menyisakan kontur berwarna saja.



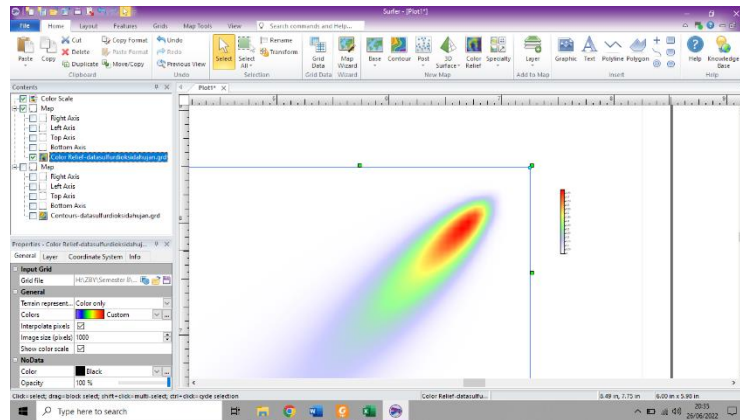
- Mengganti warna kontur dispersi yang dihasilkan sesuai selera, lalu edit untuk warna background agar menjadi transparan melalui *colormap editor* dengan memilih *Present: Ramp 0 to 100%*. Selain itu, munculkan colour palette dengan men-*checkboxlist show color scale* untuk mempermudah pembacaan sebaran emisi.



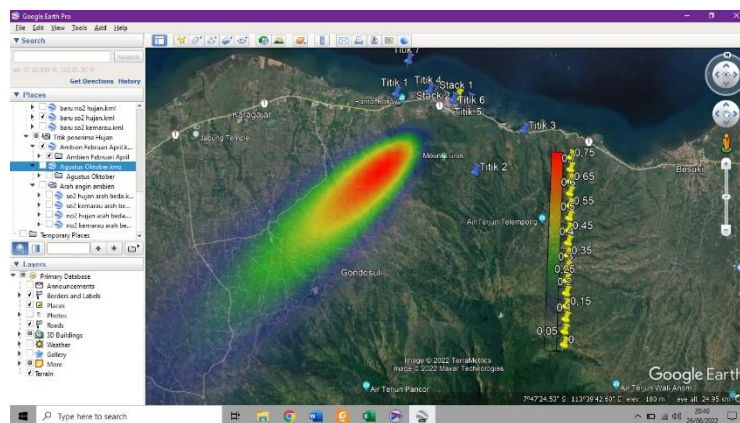
- Mengecilkan colour palette agar dapat terbaca dengan jelas ketika di-*overlay*-kan ke *Google Earth*.



- Menyimpan hasil kontur dispersi yang telah dimodif dengan melakukan *export* ke dalam bentuk kml agar dapat terbaca dengan *software Google Earth*.



- Membuka *software Google Earth*, lalu klik *File > Open* untuk file kml yang telah disimpan.



- Kontur dispersi telah di-*overlay*-kan ke dalam *software Google Earth* yang dapat menampilkan kontur lebih menarik serta *real*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN 3

FORM ASISTENSI TUGAS AKHIR



**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

FORM FTA-03

KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Zidan Badruddin Yusuf
NRP : 0321184000032
Judul : "Pemodelan Dispersi Emisi dari PT X dengan Model Gauss Termodifikasi"

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1	27/12/21	Penentuan topik tugas akhir dan tempat penelitian.	<i>Ref</i>
2	12/01/22	Pengumpulan draft proposal, kejelasan rumus dispersi untuk parameter partikulat, dan tentang verifikasi hasil model dengan data sekunder.	<i>Ref</i>
3	20/01/22	Penentuan parameter gas saja yang dilakukan pada penelitian (SO ₂ , NO _x , dan Hg).	<i>Ref</i>
4	04/02/22	Meminta izin untuk mengunjungi <i>site</i> . Memastikan beban emisi, data meteorologi lokal, dokumentasi survey, serta data lain yang penting pada penelitian untuk didapatkan semaksimal mungkin.	<i>Ref</i>
5	19/02/22	Penyetujuan pengumpulan proposal tugas akhir yang telah direvisi.	<i>Ref</i>
6	24/03/22	Asistensi melalui <i>zoom meeting</i> tentang capaian penelitian, kendala penelitian, dan cara mengatasi kendala tersebut.	<i>Ref</i>
7	08/04/22	Pengunaan data meteorologi terdekat yaitu Stasiun Geofisika Pasuruan melalui situs BMKG Online.	<i>Ref</i>
8	20/06/22	Asistensi melalui <i>zoom meeting</i> tentang perubahan konversi beban emisi, persen kandungan NO ₂ dalam NO _x , serta penambahan verifikasi model melalui arah angin hasil uji stasiun pemantau udara,	<i>Ref</i>
9	21/06/22	Asistensi melalui <i>zoom meeting</i> tentang penyampaian hasil saran asistensi sebelumnya.	<i>Ref</i>

Surabaya, 22 Juli 2022
Dosen Pembimbing


 Dr. Abdu Fadli Assomadi SSi., MT

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Pekalongan, 22 Agustus 2000. Penulis ini merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh Pendidikan formal yaitu di SD Negeri 1 Landungsari Pekalongan (2006-2012), SMP Negeri 6 Pekalongan (2012-2015), dan SMA Negeri 1 Pekalongan (2015-2018). Setelah lulus SMA di tahun 2018, penulis diterima di Departemen Teknik Lingkungan FTSPK-ITS melalui jalur SNMPTN dan terdaftar dengan NRP 03211840000032.

Selama menjalani dunia perkuliahan, penulis mengikuti berbagai macam kegiatan baik akademik maupun non-akademik. Penulis pernah menjadi Asisten Laboratorium Mikrobiologi (2019) dan Teknik Analisis Pencemar Lingkungan (2021). Selanjutnya, penulis pernah mendapatkan berbagai macam pencapaian antara lain Juara 2 serta Juara Favorit LKTI-Nasional Pesiar 2021 di Universitas Hasanudin, Penerima Insentif PKM-GT 2021, dan Juara Favorit LKTI-Nasional CeC 2020 di Universitas Negeri Yogyakarta. Selain itu, penulis pernah mengikuti proyek dalam mengevaluasi kinerja Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT) Jabon Kabupaten Sidoarjo. Penulis juga aktif di beberapa organisasi antara lain Staf Badan Pelayanan Umat JMMI ITS (2018/2019), Staff Pengembangan Manajerial UKM-Rebana ITS (2019), Wakil Ketua 1 Bidang Seni UKM-Rebana ITS (2020), Staff Kementrian Kebijakan Kampus BEM ITS (2020/2021), Kepala Departemen Dalam Negeri (DAGRI) HMTL ITS (2021), Ketua Keluarga Mahasiswa Kota Batik (2021), dan Wakil Menteri Kementerian Kebijakan Kampus BEM ITS (2021/2022). Kemudian, penulis pernah berkesempatan menjadi peserta MSIB Batch 2 Program Kampus Merdeka sebagai SHE Officer di PT Barata Indonesia (Persero) selama 5 bulan di tahun 2022. Penulis dapat dihubungi melalui surel di zby8m5@gmail.com.



UTA-S1-TL-02 TUGAS AKHIR

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)

Periode: Genap 2021/2022

No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-02

Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 11 Juli 2022

Nilai TOEFL : 517

Pukul : 13.30 - 14.45 WIB

Lokasi : TL - 104

Judul : Pemodelan Dispersi Emisi dari PT X dengan Model Gauss Termodifikasi Menggunakan Python

Nama : Zidan Badruddin Yusuf

Tanda Tangan

NRP. : 03211840000032

Topik : Penelitian

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
	<p>Abstrak diperbaiki → Judul perbaiki sesuai saran penguji tulis pemantauan sesuai dg arah disperse dominan.</p>

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-02 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing, dinyatakan mahasiswa tersebut:

1. Lulus Ujian Tugas Akhir
2. Harus mengulang Ujian Tugas Akhir semester berikutnya
3. Tugas Akhir dinyatakan gagal atau harus mengganti Tugas Akhir (lebih dari 2 semester)

Dosen Pembimbing

Dr. Abdu Fadli Assomadi, SSI., MT



UTA-S1-TL 03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2021/2022

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 11 Juli 2022
Pukul : 13.30 - 14.45 WIB
Lokasi : TL - 104
Judul : Pemodelan Dispersi Emisi dari PT X dengan Model Gauss Termodifikasi Menggunakan Python

Nama : Zidan Badruddin Yusuf
NRP. : 03211840000032
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	Judul diperbaiki → penggunaan 'phyton' & hilangkan → cukup & secara langsung
2.	Tinjauan sebaiknya mencantumkan ketiga jenis gasnya. (SO _x , NO _x dan H ₂ S).
3.	Selengkapnya sudah ok, cukup konsultasi dgn Pembimbing.

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana

Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji

Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Prof. Ir. Joni Hermana, MScEs, PhD

()

Dosen Pembimbing Dr. Abdu Fadli Assomadi, SSi MT

()



UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR-
Periode: Genap 2021/2022

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 11 Juli 2022
Pukul : 13.30 - 14.45 WIB
Lokasi : TL - 104
Judul : Pemodelan Dispersi Emisi dari PT X dengan Model Gauss Termodifikasi Menggunakan Python
Nama : Zidan Badruddin Yusuf
NRP. : 03211840000032
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	Apa itu momentum?
2.	2. 2. 2. Narasi ke kesimpulan di butuhkan
3	

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST., MEPM

()

Dosen Pembimbing Dr. Abdu Fadli Assomadi, SSi., MT

()



UTA-S1-TL-03. TUGAS AKHIR

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)

Periode: Genap 2021/2022

No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 11 Juli 2022

Pukul : 13.30 - 14.45 WIB

Lokasi : TL - 104

Judul : Pemodelan Dispersi Emisi dari PT X dengan Model Gauss Termodifikasi Menggunakan Python

Nama : Zidan Badruddin Yusuf

NRP. : 03211840000032

Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	Perbaiki Abstract, masukkan hasil = kuantitatif-nya.
2.	Perbaiki penulisan dokumen
3.	"Python" tidak perlu ada ada di judul
4.	Pembahasan utk memastikan agar hasil penelitian dapat diterapkan pertama untuk menentukan titik pantau.
5.	Kemungkinan penerapan kondisi atmosfer yang berbeda mengingat kondisi atm saat di Indonesia yg cepat berubah. Bagaimana perubahan gambarnya?
6.	Perbaiki kesimpulan

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana

Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji

Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji

Adhi Yuniarto, ST., MT., PhD.

Dosen Pembimbing

Dr. Abdu Fadli Assomadi, SSI., MT

()