

Pemodelan Dispersi Emisi SO₂ menggunakan Gaussian Dispersion Model (Studi Kasus Cerobong PLTU Kabupaten Probolinggo)

Emission Dispersion Modelling of SO₂ using Gaussian Dispersion Model (Case Study of Coal-Fired Thermal Power Plant Chimney in Probolinggo District)

Muhammad Rusydi Arif, Ahmad Erlan Afiuddin, dan Tarikh Azis Ramadan

Program Studi Teknik Pengolahan Limbah, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri
Surabaya, Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
E-mail: rusydi.arif@student.ppns.ac.idm

Diterima 31 Agustus 2020, direvisi 17 Oktober 2020, disetujui 27 Oktober 2020

ABSTRAK

Pemodelan Dispersi Emisi SO₂ menggunakan Gaussian Dispersion Model (Studi Kasus Cerobong PLTU Kabupaten Probolinggo). Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Kabupaten Probolinggo sebagai industri pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batubara menghasilkan beberapa parameter emisi dari proses industrinya, salah satunya Sulfur Dioksida (SO₂). Emisi SO₂ ini dikeluarkan melalui cerobong dimana nantinya akan menyebar ke kawasan sekitar plant. Emisi SO₂ ini dapat berbahaya bagi kesehatan masyarakat dan lingkungan sekitar apabila *Flue-Gas Desulfurization* (FGD) sebagai instalasi pengendali emisi SO₂ sedang bermasalah dan membutuhkan *corrective maintenance*. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian terkait analisis dispersi emisi SO₂ agar dapat mengestimasi dampak dari emisi tersebut terhadap lingkungan sekitar. Tujuan penelitian ini yaitu menganalisis dispersi emisi SO₂ dari cerobong PLTU Kabupaten Probolinggo Unit 9 pada musim kemarau. Penelitian dilakukan dengan menggunakan data emisi pada periode pemantauan Bulan Juli – September 2019 dan data meteorologi pada periode pemantauan Januari 2018 – Mei 2020. Pada penelitian ini, *Gaussian Dispersion Model* dipilih untuk memodelkan dispersi emisi SO₂. *Software* Surfer dan Google Earth digunakan untuk penggambaran pola dispersi emisi SO₂. Hasil penelitian menunjukkan bahwa emisi SO₂ terdispersi ke arah selatan dengan stabilitas atmosfer kelas B pada musim kemarau. Konsentrasi tertinggi emisi SO₂ berdasarkan hasil model sebesar 107,74 µg/m³ dengan koordinat 7°43'43.452" LS; 113°34'17.766" BT dan memiliki jarak sebesar 1986,87 meter dari cerobong. Setelah sampai di titik maksimum, konsentrasi emisi terus menurun seiring dengan bertambahnya jarak dari cerobong.

Kata kunci: Emisi SO₂, cerobong, PLTU, musim kemarau, *Gaussian Dispersion Model*.

ABSTRACT

Emission Dispersion Modelling of SO₂ using Gaussian Dispersion Model (Case Study of Coal-Fired Thermal Powerplant Chimney in Probolinggo District). The coal-fired thermal power plant in Probolinggo district as a coal-fired thermal power plant industry produces several emission parameters from the industrial process, one of which is Sulfur Dioxide (SO₂). Emissions of SO₂ are released through chimneys which will later disperse to the area around the plant. This emission of SO₂ can be dangerous to the public health and environment if the *Flue-Gas Desulfurization* (FGD) as an SO₂ emission control installation is having problems and requires *corrective maintenance*. Therefore, it is necessary to conduct research related to the analysis of SO₂ emissions' dispersion to estimate the impact of these emissions on the surrounding environment. The purpose of this study was to analyze the dispersion of SO₂ emissions from the chimney of the 9th coal-fired thermal power plant unit in the Probolinggo district in the dry season. This research was conducted using data monitoring emissions in the period of July –

September 2019 and the monitoring of meteorological data for the period of January 2018 – May 2020. In this study, the Gaussian Dispersion Model was chosen to model the dispersion of SO_2 emissions. Surfer and Google Earth are used to show the dispersion pattern of SO_2 emissions. The results showed that the SO_2 emissions were dispersed to the south with the class B atmosphere's stability during the dry season. The highest concentration of SO_2 emission based on the model results is $107.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ with coordinates $7^\circ 43' 43.452''\text{S}$; $113^\circ 34' 17.766''\text{E}$ and has a distance of 1986.87 meters from the chimney. After reaching the maximum point, the emission concentration continues to decrease as the distance from the stack increases.

Keywords: Emissions of SO_2 , chimney, Coal-fired thermal power plant, dry season, Gaussian Dispersion Model.

1. Pendahuluan

Aktivitas pembangkit listrik pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Kabupaten Probolinggo menggunakan bahan bakar batubara sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran udara. Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 15 Tahun 2019 tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal, pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya (KLHK, 2019). Aktivitas PLTU ini menghasilkan beberapa parameter emisi dominan, salah satunya adalah Sulfur Dioksida (SO_2). Emisi ini dikeluarkan melalui cerobong dan akan terdispersi ke beberapa kawasan yang berada di sekitar plant. Belum adanya penelitian terkait dispersi emisi ini membuat tidak bisa dilakukannya estimasi dampak emisi PLTU terhadap kawasan sekitar plant. Padahal dispersi emisi ini dapat berdampak buruk bagi lingkungan apabila *Flue-Gas Desulfurization* (FGD) bermasalah dan membutuhkan *corrective maintenance*. Emisi SO_2 yang memiliki karakteristik tidak berwarna dan berbau tajam ini dapat berdampak buruk pada penurunan fungsi paru, dimana gejala yang ditimbulkan

ditandai dengan batuk, sesak napas, dan asma (Alchamdani, 2019; Sulistyorini & Sebayang). Selain itu, emisi SO_2 dapat berpotensi menimbulkan hujan asam apabila bereaksi dengan uap air sehingga menghasilkan H_2SO_4 yang dapat mencemari air permukaan (Aikawa & Hiraki, 2009; Huang *et al.*, 2008; Sudalma, 2012). Sedangkan pada material, hujan asam dapat merusak material akibat deposisi kering asam sulfat (Satriawan, 2018; Sivaramanan, 2015).

Berdasarkan permasalahan di atas, maka diperlukan penelitian terkait identifikasi pola dispersi emisi SO_2 , dimana salah satu caranya yaitu memodelkan dengan model dispersi Gauss. Model dispersi Gauss merupakan sebuah pendekatan yang digunakan untuk mempelajari polutan di udara karena adanya turbulen difusi dan adveksi yang disebabkan oleh angin (Stockie, 2011). Model dispersi Gauss merupakan metode yang paling sesuai karena dapat memprediksi dispersi emisi dari berbagai sumber dan dapat diterapkan pada segala kondisi atmosfer (Briant *et al.*, 2013; Nanaa *et al.*, 2012). Penggunaan model dispersi Gauss untuk memodelkan dispersi emisi SO_2 PLTU sudah pernah dilakukan pada beberapa penelitian sebelumnya. Pemodelan dispersi emisi SO_2 dari PLTU Rayalaseema India menghasilkan konsentrasi maksimum $1100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada stabilitas atmosfer kelas C dan sebesar $540 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada stabilitas

atmosfer kelas D (Varma *et al.*, 2014). Pemodelan dispersi emisi SO₂ di PLTU Banten 3 Unit 1-2 menghasilkan konsentrasi maksimum berturut-turut sebesar 640,82 µg/m³ di musim hujan, serta sebesar 704,07 µg/m³ di musim kemarau (Liandy, Susanto & Yulinawati, 2015). Pemodelan dispersi emisi SO₂ dari aktivitas PLTU Lontar 3 menghasilkan konsentrasi maksimum sebesar 235 µg/m³ (Anggarani & Sitanggang, 2019). Tiga penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa setelah mencapai titik maksimum, konsentrasi emisi terus menurun seiring bertambahnya jarak dari cerobong. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola dispersi emisi SO₂ ke kawasan sekitar *plant*.

Batasan penelitian ini meliputi pemodelan dispersi emisi SO₂ di musim kemarau. Data emisi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari data *Continuous Emission Monitoring System* (CEMS) PLTU Kabupaten Probolinggo Unit 9. Data meteorologi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari data *Automatic Weather Station* (AWS) Probolinggo milik Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Luaran yang ingin dicapai dari penelitian ini berupa peta dispersi emisi SO₂ di sekitar kawasan *plant*.

2. Metodologi

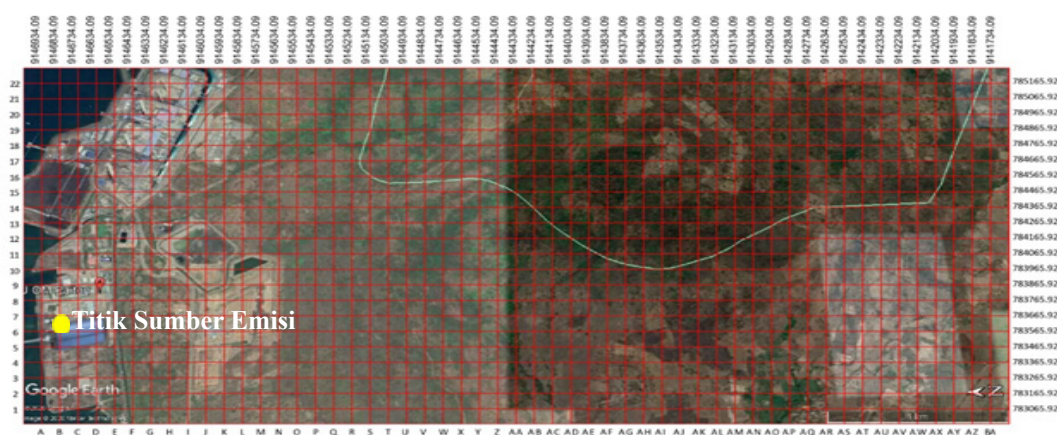
Penelitian terkait pemodelan dispersi emisi SO₂ ini terdiri dari beberapa tahapan yaitu pengumpulan data dan pembuatan model dispersi emisi. Data emisi yang

meliputi konsentrasi emisi SO₂, suhu cerobong, dan laju alir didapat dari hasil pemantauan emisi secara *Continuous Emission Monitoring System* (CEMS) PLTU Kabupaten Probolinggo Unit 9. Data meteorologi yang meliputi curah hujan, kecepatan angin, arah angin, suhu udara, intensitas radiasi matahari, dan tekanan udara didapat dari hasil pemantauan *Automatic Weather Station* (AWS) Probolinggo milik Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Pembuatan model dispersi emisi terdiri dari beberapa langkah pengerjaan yaitu penentuan musim, analisis data meteorologi, penentuan titik penerima dan perhitungan koefisien dispersi, perhitungan kecepatan angin di ketinggian cerobong, perhitungan *plume rise* dan tinggi efektif cerobong, perhitungan konsentrasi dispersi emisi, serta penggambaran pola dispersi emisi (De Visscher, 2013; Widyasari *et al.*, 2018).

Analisis data meteorologi terdiri dari penentuan musim, analisis arah dan kecepatan angin, serta penentuan kelas stabilitas atmosfer. Penentuan bulan musim kemarau didasarkan pada rata-rata curah hujan bulanan. Suatu bulan dapat diklasifikasikan dalam musim kemarau apabila memiliki curah hujan kurang dari 150 mm dalam satu bulan (Ulfah & Sulistya, 2015). Analisis arah dan kecepatan angin menggunakan *software* WRPLOT sehingga didapat rata-rata kecepatan angin dan arah angin dominan. Penentuan kelas stabilitas atmosfer didasarkan pada tabel klasifikasi

Tabel 1. Klasifikasi Stabilitas Atmosfer Pasquill-Gifford

Kecepatan Angin (m/s)	Siang Intensitas Radiasi Matahari (W/m ²)			Malam Tutupan Awan	
	Kuat (>600)	Sedang (300-600)	Rendah (<300)	Berawan	Cerah
<2	A	B	B	E	F
2-3	B	B	C	E	F
3-5	B	C	C	D	E
5-6	C	C	D	D	D
>6	C	D	D	D	D



Gambar 1. Peta Grid Titik Sumber Emisi dan Titik Penerima

Tabel 2. Persamaan Koefisien Dispersi untuk Kawasan Pedesaan

Kelas Stabilitas	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	$0,04x(1+0,0001x)^{-0,5}$	$0,016x(1+0,0003x)^{-1}$

stabilitas atmosfer Pasquill-Gifford (Koehn *et al.*, 2013).

Penentuan koordinat titik sumber emisi dan titik penerima dilakukan menggunakan *software* Google Earth. Untuk mempermudah pembuatan grid titik penerima, titik koordinat perlu diubah satuannya, dari *Degrees-Minute-Second* (DMS) ke *Universal Transverse Mercator* (UTM). Titik penerima disusun dalam grid berjarak 100 meter pada area di sekitar plant. Peta grid titik sumber emisi dan titik penerima disajikan dalam Gambar 1. Dari peta grid yang sudah disusun bisa dilakukan perhitungan koefisien dispersi di tiap titiknya. Persamaan koefisien dispersi mengacu pada persamaan Pasquill-Gifford, dimana disajikan pada Tabel 2 (De Visscher, 2013).

Pada perhitungan konsentrasi dispersi emisi dibutuhkan nilai kecepatan angin di

ketinggian cerobong. Kecepatan angin di ketinggian cerobong dapat diselesaikan dengan Persamaan 1 (De Visscher, 2013).

$$u_2 = u_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^p \dots\dots\dots (1)$$

dimana 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

Plume Rise merupakan tinggi kepulan gas buang ketika meninggalkan cerobong. Persamaan plume rise dan tinggi efektif cerobong dapat dilihat pada Persamaan 2 dan 3 (Bhargava, 2016).

$$\Delta h = \frac{V_s \cdot D_s}{U} \left[1,5 + 2,68(10^{-3})P\alpha \frac{T_s - T_a}{T_s} \right] \dots\dots\dots (2)$$

$$h = h_s + \Delta h \dots\dots\dots (3)$$

dimana h = Plume rise (m)
 V_s = Kecepatan emisi keluar dari cerobong (m/s)

- Δh_d = Diameter cerobong (m)
- Pa = Tekanan atmosfer (milibar)
- T_s = Temperatur gas di cerobong (K)
- T_a = Temperatur atmosfer (K)
- h = tinggi efektif cerobong (m)
- h_g = tinggi cerobong (m)

Perhitungan konsentrasi dispersi emisi menggunakan persamaan *Gaussian Dispersion Model*, seperti disajikan pada Persamaan 4 [15].

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

- dimana C = Konsentrasi polutan di titik (x,y,z) (g/m³)
- Q = Laju emisi (g/s)
- σ_y = Koefisien dispersi horizontal (y) (m)
- σ_z = Koefisien dispersi vertikal (z) (m)
- u = Kecepatan angin pada ketinggian cerobong (m)
- h = Ketinggian efektif cerobong (m)
- x = Kepulan horizontal searah dengan arah angin (downwind) (m)
- y = Kepulan horizontal tegak lurus dengan arah angin (crosswind) (m)
- z = Kepulan vertikal dari permukaan (m)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Data Meteorologi

Penentuan bulan musim kemarau didasarkan pada data curah hujan dalam kurun waktu lima tahun yaitu periode pemantauan Januari 2015 – Desember 2019.

Berdasarkan data tersebut dapat diketahui bahwa terdapat enam bulan yang memiliki curah hujan kurang dari 150 mm dalam satu bulan sehingga diklasifikasikan dalam musim kemarau. Enam bulan tersebut yaitu Mei, Juni, Juli, Agustus, September, dan Oktober. Hasil lengkap analisis data curah hujan disajikan pada Tabel 3.

Data arah dan kecepatan angin yang digunakan merupakan rata-rata per jam pemantauan AWS Probolinggo pada rentang Bulan Januari 2018 – Mei 2020. Berdasarkan hasil pengolahan data arah dan kecepatan angin menggunakan *software* WRPLOT dapat diketahui bahwa angin berhembus ke arah selatan dengan rata-rata kecepatan angin sebesar 2,56 m/s. Windrose musim kemarau disajikan pada Gambar 2. Berdasarkan nilai kecepatan angin sebesar 2,56 m/s dan intensitas radiasi matahari sebesar 542,8 watt/m², maka stabilitas atmosfer pada musim kemarau diklasifikasikan dalam kelas B (*moderately unstable*).

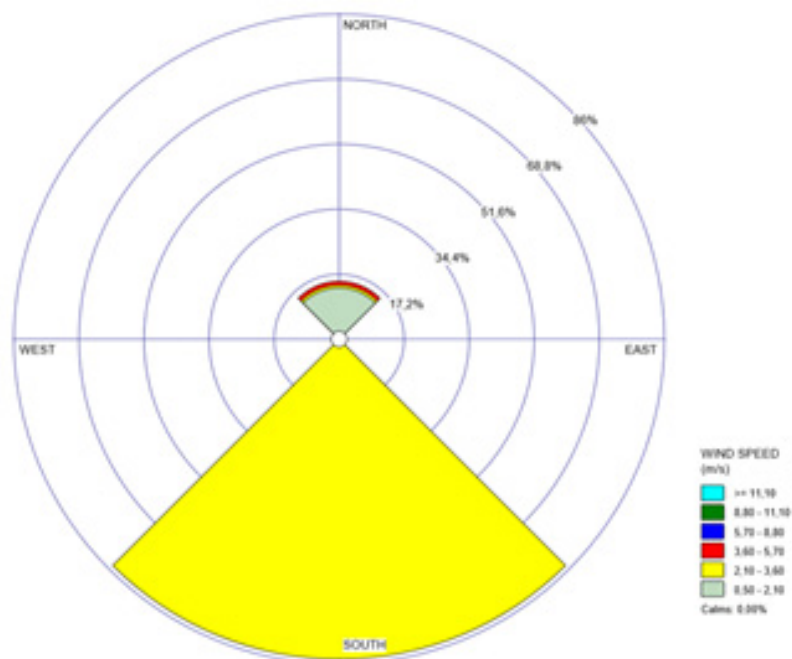
3.2. Analisis Data Meteorologi

Sebelum dilakukan perhitungan konsentrasi dispersi emisi, perlu dilakukan perhitungan data penunjangnya yaitu downwind (jarak titik dari sumber emisi searah angin) sebesar 1986,87 m, *crosswind*

Tabel 3. Curah Hujan Kabupaten Probolinggo Tahun 2015 – 2019

Bulan/Tahun	Curah Hujan (mm)					Rata-Rata	Musim
	2015	2016	2017	2018	2019		
Januari	238	236	462	336,18	53,6	265,156	Hujan
Februari	365	468	195,51	443,33	32,4	300,848	Hujan
Maret	0	240	250,18	157,15	322	193,866	Hujan
April	517	255	232,29	94,13	109	241,484	Hujan
Mei	129	213	103,82	24,56	3,6	94,796	Kemarau
Juni	120	168	59,95	27,04	0	74,998	Kemarau
Juli	0	89	5,85	1,06	1,2	19,422	Kemarau
Agustus	0	43	7,07	0	0	10,014	Kemarau
September	0	91	7,62	2,41	0	20,206	Kemarau
Oktober	0	196	37,22	0	0	46,644	Kemarau
November	242	267	180,28	65,48	0	150,952	Hujan
Desember	38	370	256,03	170,74	5,6	168,074	Hujan

Sumber : Stasiun Meteorologi Kelas I BMKG Juanda



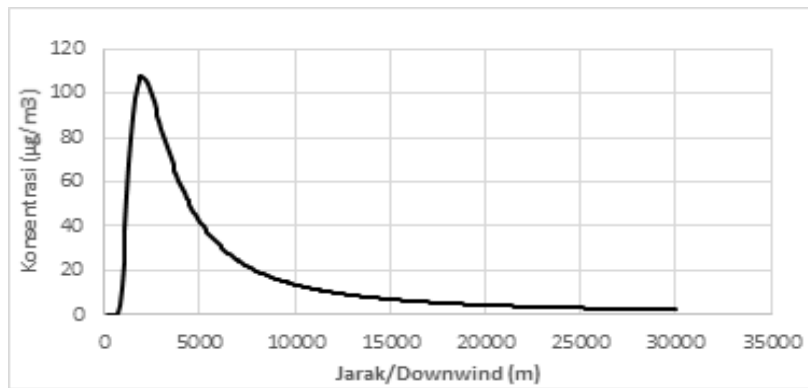
Gambar 2. Windrose Musim Kemarau (Januari 2018 – Mei 2020)

(kepuhan tegak lurus dengan arah angin) sebesar 45,07 m, koefisien dispersi σ_y sebesar 290,36 m, koefisien dispersi σ_z sebesar 238,42 m, kecepatan angin di ketinggian cerobong sebesar 4,21 m/s, *plume rise* dan tinggi efektif cerobong berturut-turut sebesar 49,68 m dan 324,68 m. Pada perhitungan konsentrasi dispersi emisi menggunakan model dispersi Gauss dapat diketahui bahwa konsentrasi tertinggi emisi SO_2 sebesar 107,74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan koordinat $7^\circ 43' 43.452''$ LS; $113^\circ 34' 17.766''$ BT dan berjarak 1986,87 meter dari cerobong. Setelah sampai di titik maksimum, konsentrasi emisi terus menurun seiring dengan bertambahnya jarak dari cerobong. Tren yang sama ditunjukkan pada pemodelan dispersi emisi SO_2 pada PLTU Rayalaseema India, dimana konsentrasi maksimumnya tercapai pada jarak 5.000 meter dari cerobong ketika stabilitas atmosfer kelas C serta pada jarak 15.000 meter dari cerobong ketika stabilitas atmosfer kelas D, konsentrasi emisi terus menurun setelah mencapai titik maksimumnya (Varma *et al.*,

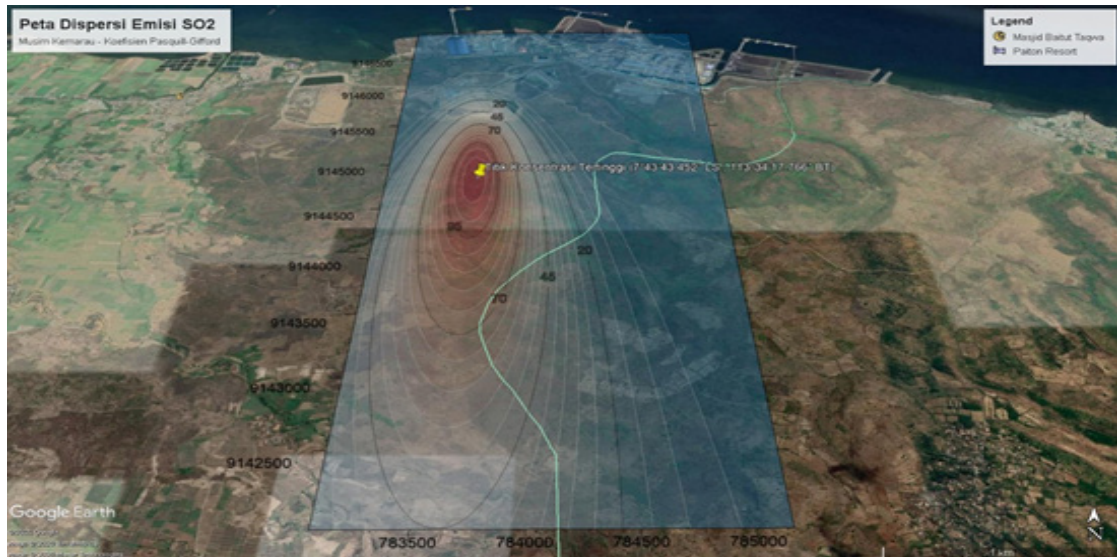
2014). Pemodelan dispersi emisi SO_2 pada PLTU Lontar 3 juga menunjukkan tren yang sama, setelah mencapai titik maksimumnya pada jarak 200 meter, konsentrasi emisi terus menurun seiring bertambahnya jarak dari cerobong (Anggarani & Sitanggang, 2019). Perbedaan jarak titik maksimum konsentrasi emisi ini dipengaruhi oleh *plume rise* cerobong dan kondisi meteorologi (Bhargava, 2016; De Visscher, 2013). Grafik konsentrasi emisi SO_2 terhadap *downwind* pada penelitian ini disajikan pada Gambar 3.

3.3. Penggambaran Pola Dispersi Emisi

Penggambaran pola dispersi emisi dilakukan dengan memasukkan data konsentrasi dispersi emisi di tiap titik ke dalam *software* Surfer. Setelah disesuaikan koordinatnya, dilakukan *overlay* gambar pola dispersi emisi ke dalam peta di Google Earth. Peta dispersi emisi SO_2 di musim kemarau disajikan pada Gambar 4, dimana setiap titik diwakili dengan warna tertentu yang merepresentasikan nilai konsentrasi emisi SO_2 di titik tersebut. Konsentrasi



Gambar 3. Grafik Konsentrasi Emisi SO₂ terhadap *Downwind* pada Musim Kemarau



Gambar 4. Peta Dispersi Emisi SO₂ di Musim Kemarau

tertinggi pada pemodelan dispersi emisi SO₂ ini sebesar 107,74 µg/m³, nilai tersebut masih di bawah baku mutu udara ambien yang sebesar 262 µg/m³ sebagaimana tercantum pada Peraturan Gubernur Jawa Timur No. 10 Tahun 2009 tentang Baku Mutu Udara Ambien dan Emisi Sumber Tidak Bergerak di Jawa Timur (Jatim, 2009).

4. Simpulan

Emisi SO₂ pada musim kemarau terdispersi ke arah selatan dengan stabilitas atmosfer kelas B. Konsentrasi tertinggi dispersi emisi SO₂ sebesar 107,74 µg/m³

yang terletak di koordinat 7°43'43.452" LS; 113°34'17.766" BT dan berjarak 1986,87 meter dari cerobong. Setelah sampai di titik maksimum, konsentrasi emisi terus menurun seiring dengan bertambahnya jarak dari cerobong.

5. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih sebesar-besarnya disampaikan penulis kepada PT. Pembangkitan Jawa Bali dan Stasiun Meteorologi Kelas I BMKG Juanda atas bantuannya dalam proses pengambilan data emisi dan meteorologi.

6. Kepengarangan

Seluruh penulis berkontribusi sesuai keahlian masing-masing dalam penyusunan naskah ini, sehingga menjadi suatu kesatuan yang tak terpisahkan.

Daftar Pustaka

- Aikawa, M., & Hiraki, T. (2009). Washout/rainout contribution in wet deposition estimated by 0.5 mm precipitation sampling/analysis. *Atmospheric Environment*, 43(32), 4935-4939.
- Alchamdani, A. (2019). NO₂ and SO₂ exposure to gas station workers health risk in Kendari City. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 11(4), 319-330.
- Anggarani, B. O., & Sitanggang, R. B. (2019). Dispersion modeling of power plant emissions on air quality. *Int J Sci Eng Res*, 10(3), 821-825.
- Bhargava, A. (2016). Effect of Stack Exit Velocity and Gas Temperature on Plume rise using different equations. *International Journal of Scientific Development and Research*, 1(4), 1-5.
- Briant, R., Seigneur, C., Gadrat, M., & Bugajny, C. (2013). Evaluation of roadway Gaussian plume models with large-scale measurement campaigns. *Geoscientific Model Development*, 6(2), 445.
- De Visscher, A. (2013). *Air dispersion modeling: foundations and applications*: John Wiley & Sons.
- Huang, K., Zhuang, G., Xu, C., Wang, Y., & Tang, A. (2008). The chemistry of the severe acidic precipitation in Shanghai, China. *Atmospheric Research*, 89(1-2), 149-160.
- Jatim, P. (2009). Peraturan Gubernur Jawa Timur nomor 10 tahun 2009 Tentang baku mutu udara ambien dan emisi sumber tidak bergerak di Jawa Timur (Vol. Nomor 10 tahun 2009). Surabaya.
- KLHK. (2019). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal. Jakarta.
- Koehn, A. C., Leytem, A. B., & Bjorneberg, D. L. (2013). Comparison of atmospheric stability methods for calculating ammonia and methane emission rates with WindTrax. *Transactions of the ASABE*, 56(2), 763-768.
- Liandy, M. K. G., Susanto, E., & Yulinawati, H. (2015). Analisis sebaran total suspended Particulate (TSP), Sulfur dioksida (SO₂), dan Nitrogen dioksida (NO₂) di udara ambien dari emisi pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) Banten 3 Lontar dengan model Gaussian. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, 7(2), 47-56.
- Nanaa, B., Sanogob, O., Savadogo, P. W., Dahoa, T., Boudad, M., & Koulidiatia, J. (2012). Air quality study in urban centers: Case study of Ouagadougou, Burkina Faso. *FUTY Journal of the Environment*, 7(1), 1-18.
- Satriawan, D. (2018). Analisis kuantitatif acidity level sebagai indikator kualitas air hujan di Kabupaten Cilacap. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, 3(2), 112-116.
- Sivaramanan, S. (2015). Acid rain, causes, effect and control strategies. Central Environmental Authority, Battaramulla.
- Stockie, J. M. (2011). The mathematics of atmospheric dispersion modeling. *Siam Review*, 53(2), 349-372.
- Sudalma, P. (2012). Analisis sifat hujan asam di Kota Semarang. *Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan*, 5, 1-7.
- Muziansyah, D., Sulistyorini, R., & Sebayang, S. (2015). Model emisi gas buangan kendaraan bermotor akibat aktivitas transportasi (Studi kasus: Terminal Pasar bawah ramayana kota Bandar Lampung). *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain (JRSDD)*, 3(1), 57-70.
- Ulfah, A., & Sulistya, W. (2015). Penentuan kriteria awal musim alternatif di wilayah Jawa Timur. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 16(3).

- Varma, S. A. K., Srimurali, M., & Varma, S. V. K. (2014). Prediction of ground level concentrations of air pollutants using gaussian model, rayalaseema thermal power project, Kadapa, AP, India. *Energy and Environmental Engineering*, 2(4), 91-97.
- Widyasari, I., Affiuddin, A. E., & Mayangsari, N. E. (2018). *Pemodelan pola sebaran no2 pada musim hujan dari cerobong PT. PJB UP Gresik*. Paper presented at the Conference Proceeding on Waste Treatment Technology.