



ANALISIS DISPERSI EMISI SULFUR DIOKSIDA (SO₂) DAN NITROGEN DIOKSIDA (NO₂) DARI CEROBONG PLTGU TANJUNG BATU KUTAI KARTANEGARA MENGGUNAKAN PERSAMAAN GAUSSIAN

Edhi Sarwono^{1*}, Rizky Aulia Sari², Budi Nining Widarti³

Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Mulawarman
Jalan Sambaliung No. 9 Kampus Gunung Kelua Samarinda 75119
Korespondensi Penulis: edhirafi@gmail.com

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) Tanjung Batu adalah industri pembangkit listrik Mahakam yang masih beroperasi di Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur. Kegiatan yang dijalankan oleh PLTGU Tanjung Batu menghasilkan limbah yang dapat mempengaruhi kualitas udara berupa emisi udara dari cerobong. Emisi yang dihasilkan oleh cerobong PLTGU Tanjung Batu tidak akan terkonsentrasi lokasi kerja saja, akan tetapi akan tersebar karena pengaruh kondisi meteorologi setempat. Penelitian ini terdiri dari pengumpulan data, pengolahan data, dan analisis data. Data yang dikumpulkan berupa data meteorologi yang didapatkan dari BMKG dan data emisi sumber tidak bergerak yang didapatkan dari PLTGU Tanjung Batu. Data arah dan kecepatan angin digunakan untuk membuat *windrose* menggunakan *software* Grapher. Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan Persamaan Gaussian berdasarkan tinggi semburan menggunakan Persamaan Briggs dan Persamaan Holland. Hasil perhitungan Persamaan Gaussian kemudian digunakan untuk membuat peta menggunakan *software* ArcGis. Sebaran emisi SO₂ dan NO₂ kemudian dianalisis berdasarkan peta dan *windrose* yang telah dibuat. Hasil perhitungan konsentrasi Persamaan Gaussian berdasarkan tinggi semburan menggunakan Persamaan Briggs dan Holland menunjukkan perbedaan signifikan pada jarak 1000 m, sementara pada jarak 2000-5000 m hasil yang ditunjukkan tidak jauh berbeda. Konsentrasi yang dihasilkan berada dibawah baku mutu Peraturan Pemerintah RI Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Daerah yang terpapar emisi pada jarak 1000-5000 m adalah Desa Tanjung Batu, Desa Embalut, Desa Karang Tunggal, Desa Bukit Raya, Desa Teluk Dalam, Desa Perjiwa, Desa Loa Pari, Desa Loa Ulung, dan Desa Loa Tebu, akan tetapi daerah yang terpapar secara dominan adalah Desa Tanjung Batu, Desa Loa Pari, Desa Loa Ulung, dan Desa Bukit Raya.

Kata Kunci: SO₂, NO₂, Persamaan Gaussian, Persamaan Briggs, Persamaan Holland, PLTGU Tanjung Batu.

1. Pendahuluan

Industri pembangkit listrik adalah salah satu industri di Kalimantan Timur yang dalam prosesnya menghasilkan energi listrik. Salah satu sektor pembangkit listrik Mahakam yang masih beroperasi yaitu PLTGU Tanjung Batu Kutai Kartanegara. PLTGU merupakan industri yang memiliki siklus gabungan antara PLTG dan PLTU. Pembangkit daya siklus gabungan pada dasarnya terdiri dari dua siklus utama, yakni siklus Brayton (siklus gas) dan siklus Rankine (siklus uap) dengan turbin gas dan turbin uap yang menyediakan daya ke jaringan. Dalam pengoperasian turbin gas, gas buang sisa pembakaran yang keluar mempunyai suhu yang relatif tinggi. Sehingga jika dibuang langsung ke atmosfer merupakan kerugian energi. Oleh karena itu, panas hasil buangan turbin gas tersebut dapat dimanfaatkan sebagai sumber panas ketel uap yang dalam hal ini disebut *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG), disamping menghasilkan efisiensi yang tinggi dan keluaran daya yang lebih besar, siklus gabung

bersifat luwes, mudah dinyalakan dengan beban tak penuh, cocok untuk operasi beban dasar dan turbin bersiklus dan mempunyai efisiensi yang tinggi dalam daerah beban yang luas (Kurniawan, 2014).

Selain pengoperasiannya yang memiliki dampak positif, industri pembangkit listrik dalam setiap kegiatan yang dijalankan akan menghasilkan limbah yang dapat mempengaruhi kualitas lingkungan. Limbah dapat berbentuk cair, gas, maupun padat yang tentunya akan mempengaruhi kualitas air, udara, dan tanah.

Dalam rangka menjaga kualitas udara, Indonesia memberlakukan regulasi Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Setiap industri tidak terkecuali PLTGU Tanjung Batu wajib mendapatkan ijin usaha dengan cara menunjukkan bahwa keberadaan PLTGU Tanjung Batu tidak akan mempengaruhi kualitas udara sekitarnya seperti yang tertera dalam regulasi. Emisi yang dihasilkan oleh cerobong PLTGU Tanjung Batu tidak akan terkonsentrasi lokasi kerja saja, akan tetapi akan tersebar karena pengaruh kondisi



meteorologi setempat. Kondisi sebaran emisi dapat ditunjukkan dengan menggunakan persamaan Gaussian.

Stabilitas Atmosfer

Kelas stabilitas yang paling sering digunakan adalah kelas stabilitas Pasquill yang terbagi atas 6 kelas: sangat tidak stabil (A), tidak stabil (B), sedikit tidak stabil (C), netral (D), sedikit stabil (E) dan stabil (F) (Pasquill, 1961; Gifford, 1961). Penentuan kelas kestabilan dapat dilakukan dengan merujuk pada Tabel 1. Kriteria untuk radiasi matahari tidak mendefinisikan secara tegas untuk semua kondisi dan memerlukan interpretasi dari pengguna (Assegaf, 2018).

Tabel 1. Penentuan Kelas Stabilitas Atmosfer

Kecepatan Angin permukaan (m/det) a	Siang dengan pancaran sinar matahari:			Malam dengan derajat awan e	
	Kuat b	Sedang c	Lemah d	Berawan (≥4/8)	Cerah (≥3/8)
	<2	A	A-B*f	B	E
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

(Sumber: Nauli, 2002)

- a. Kecepatan angin permukaan diukur pada 10 m di atas permukaan tanah.
- b. Hari cerah di musim panas dengan kedudukan matahari lebih besar dari 60° di atas horizon.
- c. Musim panas dengan sedikit awan patah-patah, atau hari cerah dengan kedudukan matahari 35° - 60° di atas horizon.
- d. Sore hari, atau mendung di musim panas, atau hari cerah dengan kedudukan matahari 15° - 35° di atas horizon.
- e. Derajat awan didefinisikan sebagai besarnya fraksi langit tertutupi awan.
- f. Kondisi A-B, B-C, atau C-D, merupakan rata-rata dari keduanya.

Keterangan:

- A = sangat tidak stabil,
- B = cukup tidak stabil,
- C = sedikit tidak stabil,
- D = netral,
- E = sedikit stabil,
- F = stabil.

Bagaimanapun kecepatan angin, kelas D harus dipilih bila keadaan mendung, baik siang maupun malam.

Menurut Liandy (2015), penentuan laju emisi menggunakan pendekatan analisis dimensi dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q = V \times A \times C \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- Q = Laju emisi (µg/detik)
- A = Luas lingkaran cerobong (m²)

C = konsentrasi polutan yang keluar dari cerobong (µg/m³)

V = kecepatan gas yang keluar dari cerobong (m/detik)
Menurut Assegaf (2018), oleh karena kecepatan angin (u) berubah terhadap ketinggian, maka kecepatan angin pada cerobong (u_s) perlu dikoreksi dengan hukum logaritmik berikut:

$$\frac{u_s}{u} = \left(\frac{h_s}{h_g}\right)^n \dots\dots\dots(2)$$

h_g adalah tinggi stasiun pengukur angin permukaan (biasa 10 m dari permukaan tanah). h_s adalah tinggi cerobong (m). Penentuan nilai n merujuk pada Tabel 2.

Tabel 2. Penentuan Exponen n berdasarkan Kelas Kestabilan

Kelas Stabilitas	A	B	C	D	E	F
n (rural)	0.10	0.15	0.20	0.25	0.25	0.30
n (urban)	0.15	0.15	0.20	0.25	0.40	0.60

(Sumber: Assegaf, 2018)

2. 1. Persamaan Gaussian

Menurut Damayanti (2019), Untuk persoalan cemaran (terhadap penduduk dan ekosistem) untuk permukaan tanah, maka bentuk persamaan dispersi Gauss yang digunakan dengan y = 0, z = 0, adalah:

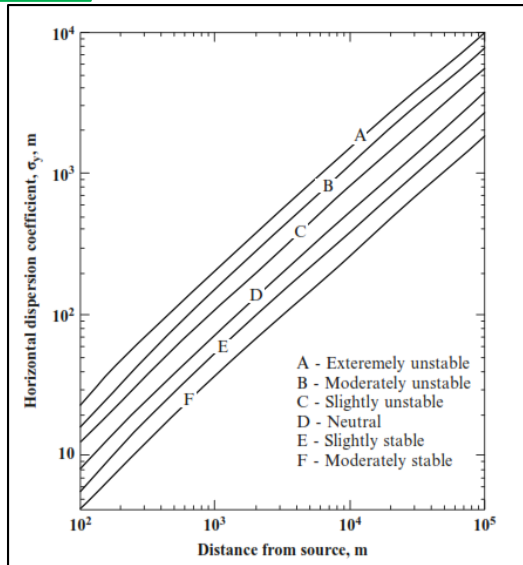
$$C(x,0,0,H) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] \dots\dots\dots(3)$$

dimana:

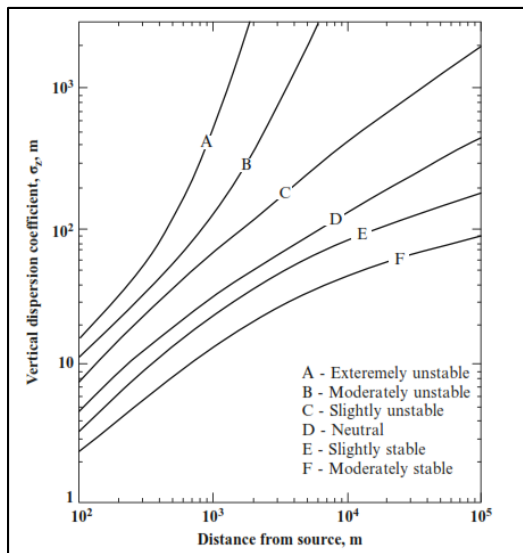
- Q = Laju emisi ozon (g/det)
- σ_y = koefisien dispersi Gauss horizontal (m)
- σ_z = koefisien dispersi Gauss vertikal (m)
- u = kecepatan angin arah sumbu x (m/detik)
- H = ketinggian efektif cerobong (m)

Koefisien Dispersi Pasquill-Gifford

Mengestimasi dispersi harus memperhitungkan fluktuasi angin horizontal dan vertikal. Sudut sebaran horizontal dari semburan pada dua jarak *downwind* dari sumber untuk stabilitas yang berbeda, grafik ketinggian semburan, juga untuk berbagai jarak *downwind* untuk stabilitas yang berbeda, dapat ditunjukkan dengan sebuah persamaan untuk menghitung konsentrasi *downwind*. Gifford menyatakan dispersi horizontal dengan σ_y dan dispersi vertikal dengan σ_z. Plot dari koefisien dispersi dalam skala logaritma sebagai fungsi dari jarak *downwind* sumber ke reseptor ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Nilai-nilai tersebut diaplikasikan untuk kondisi *rural* dan biasanya disebut Koefisien Pasquill-Gifford. Perlu diingat bahwa fungsi hanya bisa digunakan untuk jarak *downwind* dan kelas stabilitas Pasquill (Turner, 1994).



Gambar 1. Grafik Koefisien Dispersi Horizontal (σ_y) terhadap Jarak dari Sumber Emisi



Gambar 2. Grafik Koefisien Dispersi Vertikal (σ_z) terhadap Jarak dari Sumber Emisi

Persamaan Holland

Menurut Nevers (2000), perhitungan *plume rise* digunakan untuk memperkirakan nilai Δh dan H untuk digunakan dalam persamaan Gaussian dan perhitungan konsentrasi polutan yang lebih kompleks. Persamaan Holland untuk *plume rise* adalah sebagai berikut:

$$\Delta h = \frac{V_s D}{u} \left(1,5 + 2,68 \times 10^{-3} P D \frac{(T_s - T_a)}{T_s} \right) \dots \dots \dots (4)$$

dimana:

- Δh = tinggi kepulan (m)
- V_s = kecepatan gas buang (m/s)
- D = diameter cerobong (m)
- u = kecepatan angin (m/s)
- P = tekanan atmosfer (milibar)

- T_s = suhu gas buang (K)
- T_a = suhu atmosfer (K)

Persamaan Briggs

Tinggi kepulan kemungkinan disebabkan oleh: *buoyancy* (pada *exhaust* gas panas) dan momentum (pada *exhaust* dengan kecepatan tinggi). Biasa kontribusi momentum relatif kecil dan dapat diabaikan (Assegaf, 2018). Menurut Turner (1994), untuk menghitung tinggi kepulan, *buoyancy flux* harus dihitung terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan Briggs sebagai berikut:

$$F = \frac{g v d^2 \Delta T}{4 T_s} \dots \dots \dots (5)$$

dimana:

- F = Buoyancy Flux, $m^4 s^{-3}$
- g = percepatan gravitasi, $9,8 m s^{-2}$
- v = kecepatan gas buang, m/s
- d = diameter cerobong, m
- ΔT = suhu gas buang dikurangi dengan suhu atmosfer, K
- T_s = suhu gas buang, K

Menurut Turner (1994), terdapat perbedaan persamaan yang digunakan dalam menghitung tinggi semburan untuk *buoyancy flux* kurang dari 55 dan lebih dari 55. Untuk menghitung tinggi semburan final dengan *buoyancy flux* < 55 adalah sebagai berikut:

$$\Delta H = \frac{21,425 F^{3/4}}{u_h} \dots \dots \dots (6)$$

dimana u_h adalah kecepatan angin di ujung cerobong. Menurut Turner (1994), untuk $F > 55$ maka menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\Delta H = \frac{38,71 F^{3/5}}{u_h} \dots \dots \dots (7)$$

Menurut Turner (1994), selama *buoyancy* semburan memiliki temperature yang lebih tinggi dari suhu atmosfer sekitar, semburan akan terus bertambah tinggi. Tinggi semburan ketika temperature semburan berkurang diestimasi dengan persamaan 8. Persamaan ini berlaku untuk semua kondisi kelas atmosfer, tidak stabil, netral, atau stabil.

$$\Delta H = \frac{1,6 F^{1/3} x^{2/3}}{u_h} \dots \dots \dots (2.5) \dots \dots (8)$$

dimana x adalah jarak *downwind* dalam meter. Menurut Turner (1994), persamaan 8 bisa digunakan untuk mengestimasi tinggi semburan akhir dan mengetahui jarak *downwind* ketika semburan mencapai tinggi maksimal dalam meter. Persamaan untuk



mengetahui jarak *downwind* ketika semburan mencapai tinggi maksimal adalah sebagai berikut:

$$\text{Untuk kondisi tidak stabil-stabil, } F < 55, \\ Xf=49F^{5/8} \dots\dots\dots(9)$$

$$\text{Untuk kondisi tidak stabil-stabil, } F > 55, \\ Xf=119F^{2/5} \dots\dots\dots(10)$$

$$\text{Untuk kondisi stabil,} \\ Xf=2,07us^{-1/2} \dots\dots\dots(11)$$

Tinggi Cerobong Efektif

Dengan demikian tinggi cerobong efektif dapat dihitung dengan menjumlahkan tinggi cerobong dan tinggi keputan:

$$H_e = h_s + \Delta h - z \dots\dots\dots(12)$$

Dengan: h_s menyatakan tinggi cerobong (m), Δh : tinggi keputan (m) dan z : ketinggian reseptor (m). Pada dasar persamaan h berlaku untuk kondisi flat ($z=0$). Walaupun demikian, dapat saja diperhitungkan ketinggian reseptor jika ketinggian kurang dari 10% dari ketinggian cerobong (relatif datar). Untuk kasus *complex terrain*, maka diperlukan formula khusus untuk menangani kasus ini (Assegaf, 2018).

2. Metode Penelitian

Pengumpulan Data

Adapun data-data yang dikumpulkan antara lain:

1. Data meteorologi yang diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Stasiun Temindung Samarinda. Data berupa arah dan kecepatan angin rata-rata bulanan, penyinaran matahari rata-rata bulanan, dan temperatur udara rata-rata bulanan selama 5 tahun terakhir.
2. Data emisi SO_2 dan NO_2 yang dihasilkan dari cerobong mesin GT2 PLTGU Tanjung Batu pada semester I tahun 2017, semester II tahun 2017, semester I tahun 2018, dan semester II tahun 2018.
3. Data pendukung dari PLTGU Tanjung Batu berupa tinggi cerobong, diameter cerobong, suhu gas buang cerobong, dan kecepatan gas buang cerobong.

Pengolahan Data

Tahapan pengolahan adalah sebagai berikut.

1. Mengolah data meteorologi yaitu kecepatan angin, penyinaran matahari, dan suhu udara untuk mengetahui kondisi rata-rata kecepatan angin, penyinaran matahari, dan suhu udara dari tahun 2014-2018.
2. Membuat *windrose* semester I tahun 2017, semester II tahun 2017, semester I tahun 2018, dan

semester II tahun 2018 menggunakan *software* Grapher versi 15 dari data arah dan kecepatan angin untuk mengetahui arah angin dominan pada semester I tahun 2017, semester II tahun 2017, semester I tahun 2018, dan semester II tahun 2018.

3. Menentukan kelas stabilitas atmosfer berdasarkan data kecepatan angin dan penyinaran matahari yang didapatkan dari BMKG Stasiun Temindung Samarinda.
4. Menghitung laju emisi berdasarkan data konsentrasi emisi SO_2 dan NO_2 , kecepatan gas buang, diameter dalam cerobong menggunakan *software* Microsoft Excell.
5. Menghitung kecepatan angin pada ketinggian h (tinggi cerobong) berdasarkan data kecepatan angin pada ketinggian 10 meter dan tinggi cerobong GT2 PLTGU Tanjung Batu.
6. Menentukan koefisiensi dispersi vertikal dan horizontal menggunakan estimasi jarak pemaparan x yaitu 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m, dan 5000 m sesuai dengan kelas stabilitas atmosfer.
7. Menghitung ketinggian semburan (*plume rise*) menggunakan persamaan Holland.
8. Menghitung *buoyancy flux* berdasarkan data kecepatan gas buang, diameter cerobong, suhu gas buang, dan suhu atmosfer.
9. Menghitung jarak *downwind* ketika semburan mencapai ketinggian maksimal.
10. Menghitung ketinggian semburan (*plume rise*) maksimal menggunakan persamaan Briggs.
11. Menghitung tinggi efektif cerobong.
12. Menghitung konsentrasi polutan berdasarkan hasil perhitungan laju emisi, kecepatan angin di ujung cerobong, tinggi efektif cerobong, serta koefisien dispersi menggunakan persamaan Gaussian.
13. Membuat gambar dispersi polutan berdasarkan jarak pemaparan (x) dan koefisien dispersi horizontal (σ_y) menggunakan *software* AutoCAD. Berkas gambar disimpan ke dalam bentuk (.dwg) dan dikonversi ke dalam bentuk *shapefile* (.shp).
14. Membuat peta dispersi emisi SO_2 dan NO_2 pada semester I dan II pada tahun 2017 dan semester I dan II pada tahun 2018 menggunakan aplikasi ArcGis 10.4.

3. Hasil dan Pembahasan

Analisa Meteorologi

Kecepatan angin rata-rata di area PLTGU Tanjung Batu sebesar 1,953 m/s yang merupakan angin lemah. Angin lemah merupakan angin yang dapat dirasakan di wajah dan menggerakkan dedaunan dan kincir angin serta tergolong aman dan tidak menyebabkan kerusakan bagi makhluk hidup. Dengan kecepatan angin sebesar 1,953 m/s maka proses pengenceran pencemar di udara tergolong lambat sehingga akan terjadi konsentrasi senyawa di dekat sumber emisi dan dapat berbahaya



bila terdapat sumber emisi dengan tingkat pencemar yang tinggi.

Intensitas penyinaran matahari rata-rata dari tahun 2014 sampai 2018 adalah 39,21°. Semakin miring sudut datang sinar matahari maka panas yang datang semakin berkurang. Hasil ini menunjukkan bahwa intensitas penyinaran matahari di area PLTGU Tanjung Batu tergolong sedang sehingga proses pengenceran senyawa di udara juga tergolong sedang. Suhu udara rata-rata dari tahun 2014-2018 adalah 27,82°C atau 300,97 K. Hasil tersebut menunjukkan bahwa suhu udara di area PLTGU Tanjung Batu berada dalam kategori normal.

Kelas Stabilitas Atmosfer

Kecepatan angin pada lokasi kegiatan adalah 1,953 m/s dan intensitas penyinaran matahari adalah sebesar 39,21°. Intensitas penyinaran matahari sebesar 39,21° menunjukkan bahwa intensitas penyinaran matahari berada pada keadaan sedang. Menurut Tabel 1, kelas stabilitas atmosfer berada pada kelas A-B. Kelas A menunjukkan bahwa stabilitas atmosfer tergolong sangat tidak stabil sementara kelas B berarti tidak stabil.

Tabel 2. Laju Emisi NO₂ dan SO₂ Tahun 2017-2018

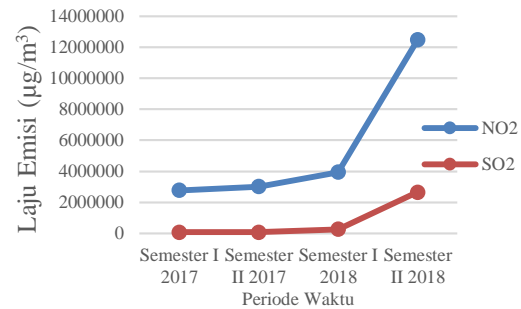
No	Sumber Pencemar	Konsentrasi Pencemar (µg/m ³)	Luas Penampang (m ²)	Kecepatan Gas Buang (m/s)	Laju Emisi (µg/s)
1	NO ₂ Semester I Tahun 2017	32065,24	4,911	17,63	2.776.076
2	NO ₂ Semester II Tahun 2017	38478,28	4,911	15,99	3.021.404
3	NO ₂ Semester I Tahun 2018	41226,73	4,911	19,49	3.945.803
4	NO ₂ Semester II Tahun 2018	203202,00	4,911	12,50	12.473.336
5	SO ₂ Semester I Tahun 2017	916,1496	4,911	17,63	79.316,47
6	SO ₂ Semester II Tahun 2017	916,1496	4,911	15,99	71.938,19
7	SO ₂ Semester I Tahun 2018	2748,449	4,911	19,49	263.053,50
8	SO ₂ Semester II Tahun 2018	43242,26	4,911	12,50	2.654.380

Laju Emisi

Laju emisi berarti banyaknya emisi yang keluar dari cerobong dalam 1 detik. Laju emisi dipengaruhi oleh kecepatan gas buang (Vs) cerobong dalam satuan m/s,

luas penampang (A) cerobong dalam satuan m², dan konsentrasi pencemar (C) yang keluar dari cerobong dalam satuan µg/m³.

Laju emisi tertinggi SO₂ dan NO₂ terjadi pada semester II tahun 2018 dikarenakan meningkatnya konsentrasi pencemar SO₂ dan NO₂ secara drastis dibandingkan semester-semester sebelumnya, sementara nilai luas penampang tetap dan kecepatan gas buang sedikit turun.



Gambar 3. Laju Emisi NO₂ dan SO₂

Nilai laju emisi meningkat sedikit demi sedikit pada semester I tahun 2017 hingga semester I tahun 2018 tetapi meningkat tajam pada semester II tahun 2018. Hal ini dikarenakan nilai konsentrasi pencemar (C) yang meningkat tajam dibanding 3 semester sebelumnya sehingga dapat disimpulkan bahwa besaran nilai laju emisi (Q) dipengaruhi oleh konsentrasi emisi yang dikeluarkan oleh cerobong.

Kecepatan Angin pada Ketinggian h

Kecepatan angin berbeda pada ketinggian tertentu, pengukuran kecepatan angin yang dilakukan oleh BMKG Stasiun Temindung Samarinda menggunakan alat pengukur dengan ketinggian 10 m. Data kecepatan angin tersebut harus disesuaikan terlebih dahulu dengan ketinggian cerobong GT2 PLTGU Tanjung Batu.

Tabel 3. Kecepatan Angin pada Ketinggian Cerobong Tahun 2017-2018

No.	Periode Waktu	Kecepatan Angin pada Ketinggian 10 m	Kecepatan Angin pada Ketinggian Cerobong
1	Semester I Tahun 2017	1,9 m/s	2,072 m/s
2	Semester II Tahun 2017	2 m/s	2,181 m/s
3	Semester I Tahun 2018	1,8 m/s	1,963 m/s
4	Semester II Tahun 2018	1,8 m/s	1,963 m/s

Kecepatan angin tertinggi yaitu pada semester II Tahun 2017 yaitu sebesar 2,181 m/s. Sementara pada tahun 2018 kecepatan angin pada semester I dan II adalah sama yaitu 1,963 m/s.



Koefisien Dispersi

Koefisien dispersi yang akan digunakan dalam perhitungan adalah koefisien dispersi horizontal (σ_y) dan koefisien dispersi vertikal (σ_z) pada jarak reseptor yang telah ditentukan yaitu pada jarak 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m, dan 5000 m.

Tabel 4. Koefisien Dispersi Horizontal (σ_y)

No	Jarak Reseptor	Koefisien Dispersi Horizontal (σ_y)		
		A	B	Rata-rata
1	1000	209	154	181,5
2	2000	384	286	335
3	3000	546	409	477,5
4	4000	701	527	614
5	5000	851	641	746

Tabel 5. Koefisien Dispersi Horizontal (σ_z)

No	Jarak Reseptor	Koefisien Dispersi Horizontal (σ_z)		
		A	B	Rata-rata
1	1000	454	109	281,5
2	2000	1968	234	1101
3	3000	4643	365	2504
4	4000	5000	500	2750
5	5000	5000	639	2819,5

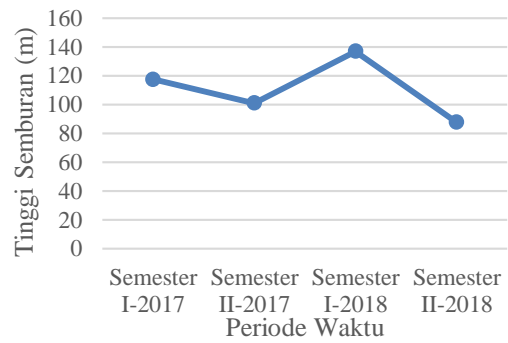
Persamaan Holland

Berikut adalah hasil perhitungan tinggi semburan (Δh) menggunakan persamaan Holland pada semester I tahun 2017, semester II tahun 2017, semester I tahun 2018, dan semester II tahun 2018 yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Tinggi Semburan (Δh) menggunakan Persamaan Holland

No.	Periode Waktu	Tinggi Semburan (m)
1	Semester I Tahun 2017	117,488
2	Semester II Tahun 2017	101,196
3	Semester I Tahun 2018	137,073
4	Semester II Tahun 2018	87,858

Tinggi semburan (Δh) tertinggi hingga terendah adalah pada semester I tahun 2018 yaitu sebesar 137,073 m, semester I tahun 2017 yaitu sebesar 117,488 m, semester II tahun 2017 yaitu sebesar 101,196 m, lalu semester II tahun 2018 yaitu sebesar 87,858 m.



Gambar 4. Tinggi Semburan (Δh) menggunakan Persamaan Holland Tahun 2017-2018

Tinggi semburan (Δh) dari semester I tahun 2017 ke semester II tahun 2017 mengalami penurunan. Tinggi semburan (Δh) dari semester II tahun 2017 ke semester I tahun 2018 mengalami kenaikan. Tinggi semburan (Δh) dari semester I tahun 2018 ke semester II tahun 2018 kembali mengalami penurunan. Hal ini serupa dengan nilai kecepatan gas buang dari semester I tahun 2017 hingga semester II tahun 2018, sehingga tinggi semburan (Δh) dari cerobong GT2 PLTGU Tanjung Batu dipengaruhi oleh kecepatan gas buang cerobongnya, sementara kecepatan angin dan suhu udara tidak mengalami perubahan yang besar sehingga tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap perubahan nilai tinggi semburan (Δh) cerobong GT2 PLTGU Tanjung Batu.

Tabel 7. Hasil Perhitungan Tinggi semburan (Δh) menggunakan Persamaan Briggs

No.	Periode Waktu	Bouyancy (F)	Kec. Angin (u)	Tinggi semburan (Δh) (m)
1	Semester I Tahun 2017	165,105	2,072	399,974
2	Semester II Tahun 2017	149,677	2,181	358,254
3	Semester I Tahun 2018	182,477	1,963	448,314
4	Semester II Tahun 2018	116,934	1,963	343,258

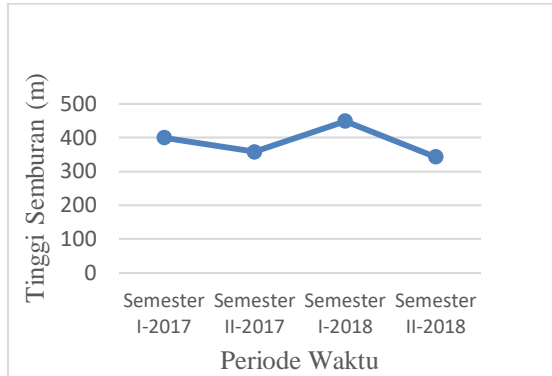
Persamaan Briggs

Berikut adalah hasil perhitungan tinggi semburan (Δh) menggunakan persamaan Briggs pada semester I tahun 2017, semester II tahun 2017, semester I tahun 2018, dan semester II tahun 2018 yang ditunjukkan pada Tabel 7.

Berdasarkan Tabel 7, tinggi semburan (Δh) tertinggi hingga terendah adalah pada semester I tahun 2018 yaitu sebesar 448,314 m, semester I tahun 2017 yaitu sebesar 399,974 m, semester II tahun 2017 yaitu sebesar



358,254 m, semester II tahun 2018 yaitu sebesar 343,258 m.



Gambar 5. Ketinggian Semburan Δh menggunakan Persamaan Briggs Tahun 2017-2018

Berdasarkan Gambar 6, tinggi semburan (Δh) dari semester I tahun 2017 ke semester II tahun 2017 mengalami penurunan. Tinggi semburan (Δh) dari semester II tahun 2017 ke semester I tahun 2018 mengalami kenaikan. Tinggi semburan (Δh) dari semester I tahun 2018 ke semester II tahun 2018 kembali mengalami penurunan. Hal ini serupa dengan nilai *buoyancy* (F) dari semester I tahun 2017 hingga semester II tahun 2018, sehingga nilai tinggi semburan (Δh) dari cerobong GT2 PLTGU Tanjung Batu dipengaruhi oleh *buoyancy* (F) cerobongnya.

Tinggi Efektif Cerobong

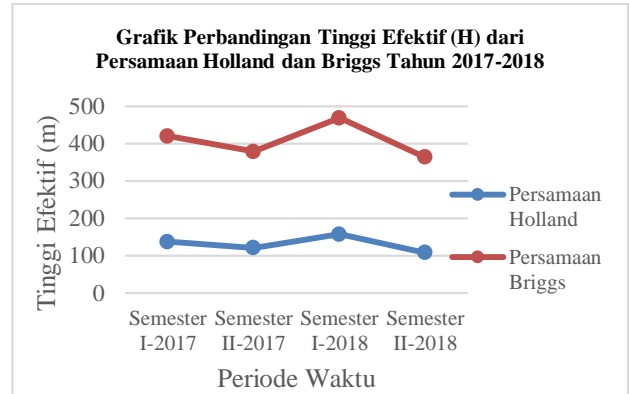
Berikut adalah hasil perhitungan tinggi efektif (H) berdasarkan tinggi semburan (Δh) dari Persamaan Holland dan Persamaan Briggs yang ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Perhitungan Tinggi Efektif (H) Tahun 2017-2018

No.	Periode Waktu	Tinggi cerobong (hs)	Persamaan Holland		Persamaan Briggs	
			Δh	H	Δh	H
1	Semester I Tahun 2017	20	117,488	137,488	399,974	419,974
2	Semester II Tahun 2017	20	101,196	121,196	358,254	378,254
3	Semester I Tahun 2018	20	137,073	157,073	448,314	468,314
4	Semester II Tahun 2018	20	87,858	107,858	343,258	363,258

Berdasarkan Tabel 8, tinggi efektif cerobong (H) dari Persamaan Holland tertinggi hingga terendah adalah pada semester I tahun 2018 yaitu sebesar 157,073 m, semester I tahun 2017 yaitu sebesar 137,488 m, semester II tahun 2017 yaitu sebesar 121,196 m, lalu semester II tahun 2018 yaitu sebesar 107,858 m. Tinggi efektif cerobong (H) dari persamaan Briggs tertinggi

hingga terendah adalah pada semester I tahun 2018 yaitu sebesar 468,314 m, semester I tahun 2017 yaitu sebesar 419,974 m, semester II tahun 2017 yaitu sebesar 378,254 m, lalu semester II tahun 2018 yaitu sebesar 363,258 m.



Gambar 6. Perbandingan Tinggi Efektif (H) dari Persamaan Holland dan Persamaan Briggs Tahun 2017-2018

Berdasarkan Gambar 7, tinggi efektif cerobong (H) berdasarkan tinggi semburan dari Persamaan Holland dan Briggs dari semester I tahun 2017 ke semester II tahun 2017 mengalami penurunan, dari semester II tahun 2017 ke semester I tahun 2018 mengalami kenaikan, dan dari semester I tahun 2018 ke semester II tahun 2018 kembali mengalami penurunan. Hal ini serupa dengan nilai tinggi semburan (Δh) dari Persamaan Holland dan Persamaan Briggs pada semester I tahun 2017 hingga semester II tahun 2018, sehingga tinggi efektif cerobong (H) dari cerobong GT2 PLTGU Tanjung Batu dipengaruhi oleh tinggi semburan (Δh).

Persamaan Gaussian

Konsentrasi Emisi SO_2

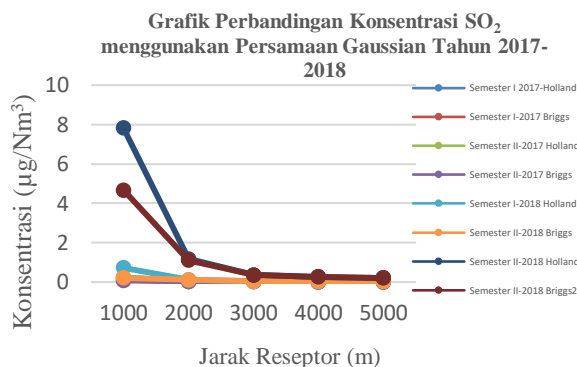
Perhitungan konsentrasi emisi SO_2 menggunakan Persamaan Gaussian berdasarkan tinggi semburan (Δh) dari Persamaan Holland dan Persamaan Briggs.

Berdasarkan baku mutu Peraturan Pemerintah RI Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara, kadar SO_2 pada udara ambien yang diperbolehkan adalah $365 \mu g/Nm^3$ atau $334,40 \mu g/m^3$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa konsentrasi SO_2 di semester I tahun 2017, semester II tahun 2017, semester I tahun 2018, dan semester II tahun 2018 pada jarak reseptor 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m, dan 5000 m berada di bawah baku mutu.



Tabel 9. Hasil Perhitungan Konsentrasi SO₂ menggunakan Persamaan Gaussian

No.	Periode Waktu	Jarak Reseptor	Persamaan Holland C (µg/m ³)	Persamaan Briggs C (µg/m ³)
1	Semester I Tahun 2017	1000	0,212	0,078
		2000	0,033	0,031
		3000	0,010	0,010
		4000	0,007	0,007
2	Semester II Tahun 2017	1000	0,187	0,083
		2000	0,028	0,027
		3000	0,009	0,009
		4000	0,006	0,006
3	Semester I Tahun 2018	1000	0,714	0,209
		2000	0,114	0,106
		3000	0,036	0,035
		4000	0,025	0,025
4	Semester II Tahun 2018	1000	7,824	3,662
		2000	1,161	1,105
		3000	0,359	0,356
		4000	0,255	0,253
		5000	0,204	0,203



Gambar 7 Perbandingan Konsentrasi SO₂ menggunakan Persamaan Gaussian Tahun 2017-2018

Berdasarkan Gambar 8, dapat dilihat bahwa grafik nilai konsentrasi SO₂ pada jarak 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m, dan 5000 m menggunakan Persamaan Holland dan Persamaan Briggs memiliki pola yang berbeda. Persamaan Holland menunjukkan konsentrasi SO₂ tinggi saat jarak reseptor 1000 m kemudian turun tajam pada jarak reseptor 2000 m. Sebaliknya Persamaan Briggs menunjukkan konsentrasi SO₂ pada jarak reseptor 1000 m ke 5000 m mengalami penurunan secara konstan. Hal ini disebabkan karena Briggs mempertimbangkan adanya *buoyancy flux* dan ketinggian semburan maksimum sehingga konsentrasi yang dihasilkan lebih kecil daripada konsentrasi yang dihasilkan oleh Holland.

Konsentrasi Emisi NO₂

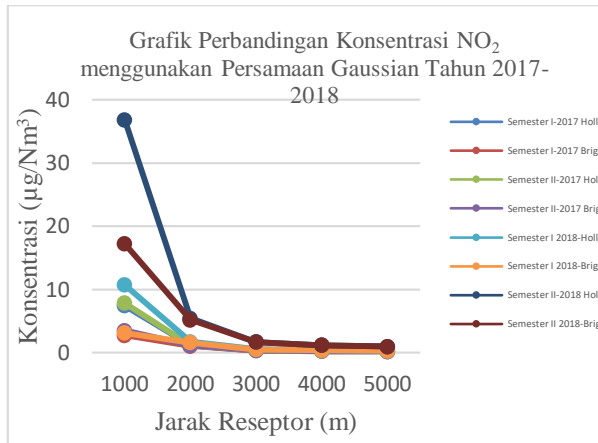
Setelah melakukan perhitungan dan analisa terhadap konsentrasi SO₂, berikut adalah hasil perhitungan konsentrasi NO₂ pada jarak reseptor 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m, dan 5000 m menggunakan Persamaan Gaussian.

Tabel 10. Hasil Perhitungan Konsentrasi NO₂ menggunakan Persamaan Gaussian

No.	Periode Waktu	Jarak Reseptor	Persamaan Holland C (µg/m ³)	Persamaan Briggs C (µg/m ³)
1	Semester I Tahun 2017	1000	7,405	2,741
		2000	1,147	1,075
		3000	0,356	0,352
		4000	0,252	0,250
2	Semester II Tahun 2017	1000	7,862	3,497
		2000	1,188	1,126
		3000	0,368	0,364
		4000	0,261	0,259
3	Semester I Tahun 2018	1000	10,712	3,137
		2000	1,716	1,584
		3000	0,534	0,526
		4000	0,378	0,373
4	Semester II Tahun 2018	1000	36,767	17,208
		2000	5,455	5,191
		3000	1,689	1,673
		4000	1,196	1,187
		5000	0,960	0,953

Berdasarkan baku mutu Peraturan Pemerintah RI Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara, kadar NO₂ pada udara ambien yang diperbolehkan adalah 150 µg/Nm³ atau 137,42 µg/m³. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa konsentrasi NO₂ di semester I tahun 2017, semester II tahun 2017, semester I tahun 2018, dan semester II tahun 2018 pada jarak reseptor 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m, dan 5000 m berada di bawah baku mutu.

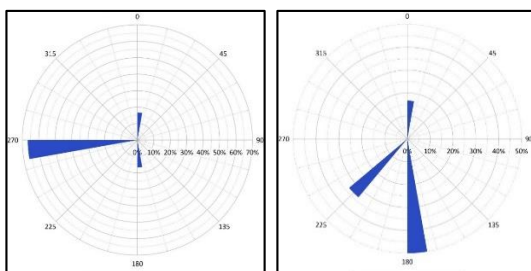
Berdasarkan Gambar 9, dapat dilihat bahwa grafik nilai konsentrasi NO₂ pada jarak 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m, dan 5000 m menggunakan Persamaan Holland dan Persamaan Briggs memiliki pola yang berbeda. Persamaan Holland menunjukkan konsentrasi NO₂ tinggi saat jarak reseptor 1000 m kemudian turun tajam pada jarak reseptor 2000 m. Sebaliknya Persamaan Briggs menunjukkan konsentrasi NO₂ pada jarak reseptor 1000 m ke 5000 m mengalami penurunan secara konstan. Hal ini disebabkan karena Briggs mempertimbangkan adanya *buoyancy flux* dan ketinggian semburan maksimum sehingga konsentrasi yang dihasilkan lebih kecil daripada konsentrasi yang dihasilkan oleh Holland.



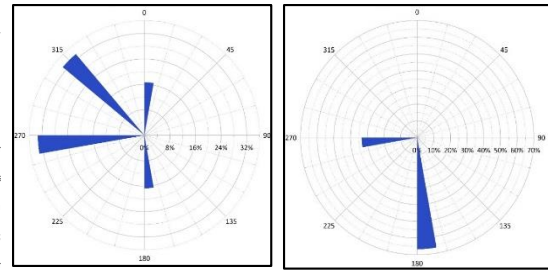
Gambar 8. Perbandingan Konsentrasi NO₂ menggunakan Persamaan Gaussian Tahun 2017-2018

Windrose

Arah angin pada semester I tahun 2017 adalah ke arah barat sebanyak 66,67%, ke arah utara sebanyak 16,67%, ke arah dan selatan sebanyak 16,66% sehingga dapat disimpulkan bahwa arah angin dominan pada semester I tahun 2017 adalah ke arah barat. Arah angin pada semester II tahun 2017 adalah ke arah selatan sebanyak 50%, ke arah barat daya sebanyak 33,33%, dan ke arah utara sebanyak 16,67% sehingga dapat disimpulkan bahwa arah angin dominan pada semester II tahun 2017 adalah ke arah selatan. Arah angin pada semester I tahun 2018 adalah ke arah barat laut sebanyak 33,33%, ke arah barat sebanyak 33,33%, ke arah selatan sebanyak 16,67%, dan ke arah utara sebanyak 16,67% sehingga dapat disimpulkan bahwa arah angin dominan pada semester I tahun 2018 adalah ke arah barat laut dan barat. Arah angin pada semester II tahun 2018 adalah ke arah selatan sebanyak 66,67% dan ke arah barat sebanyak 33,33% sehingga dapat disimpulkan bahwa arah angin dominan pada semester II tahun 2018 adalah ke arah selatan.



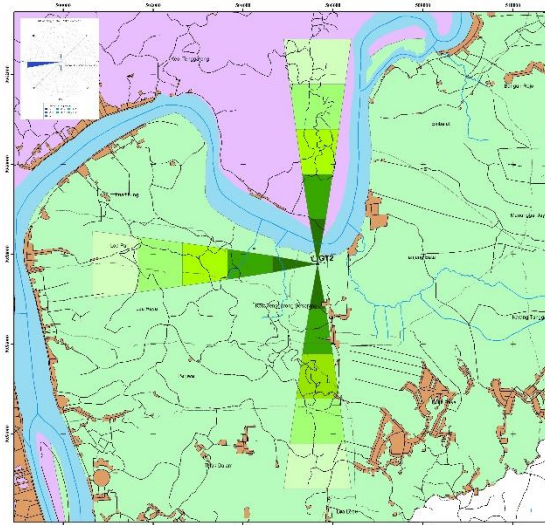
Windrose Semester I Windrose Semester II
Gambar 9. Windrose Tahun 2017



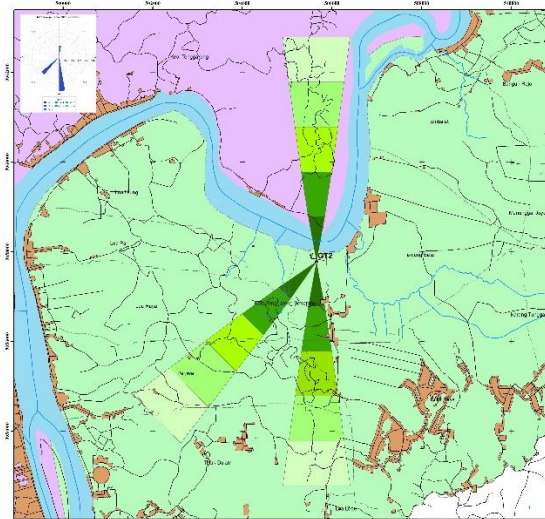
Windrose Semester I Windrose Semester II
Gambar 10. Windrose Tahun 2018

Peta Sebaran Emisi SO₂ dan NO₂

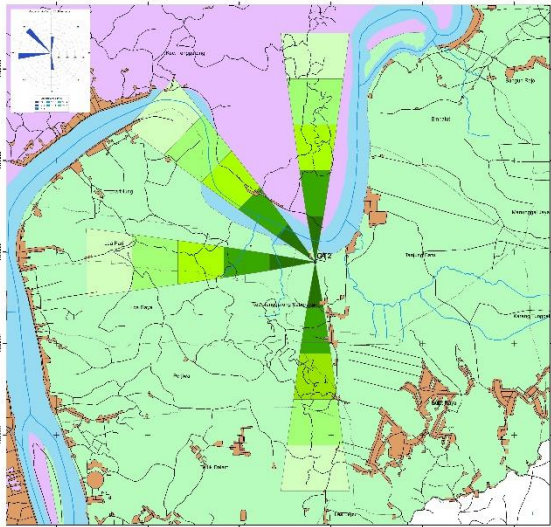
Berikuti adalah peta hasil sebaran emisi SO₂ dan NO₂.



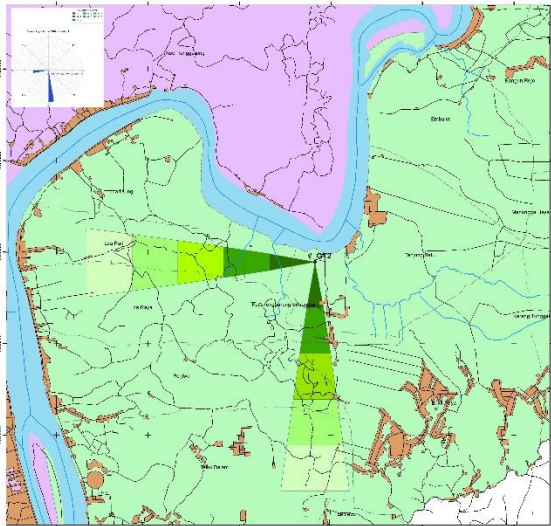
Gambar 11. Sebaran Emisi SO₂ dan NO₂ pada semester I Tahun 2017



Gambar 12. Sebaran Emisi SO₂ dan NO₂ pada semester II Tahun 2017



Gambar 13. Sebaran Emisi SO₂ dan NO₂ pada semester I Tahun 2018



Gambar 14. Sebaran Emisi SO₂ dan NO₂ pada semester II Tahun 2018

Berdasarkan peta yang telah dibuat menunjukkan daerah paparan emisi SO₂ dan NO₂ dari sumber emisi hingga jarak reseptor 5000 m adalah Desa Tanjung Batu, Desa Loa Ulung, Desa Loa Pari, Desa Loa Raya, Desa Perjiwa, Desa Teluk Dalam, Desa Bukit Raya, dan Desa Loa Tebu. Dispersi emisi SO₂ dan NO₂ di tahun 2017 dan 2018 dipengaruhi oleh arah angin dominan di tahun 2017 dan 2018. Pada semester I tahun 2017, arah angin dominan yaitu ke arah barat sehingga emisi SO₂ dan NO₂ juga bergerak ke arah barat menuju Desa Tanjung Batu, Desa Loa Ulung, Desa Loa Pari, dan Desa Loa Raya dimana pemukiman penduduk terdapat di Desa Loa Pari. Pada semester II tahun 2017, arah angin dominan yaitu ke arah selatan sehingga emisi SO₂ dan NO₂ juga bergerak ke arah selatan menuju Desa Tanjung Batu, Desa Loa Raya, Desa Perjiwa, Desa

Teluk Dalam, dan Desa Bukit Raya di mana pemukiman penduduk terdapat di Desa Tanjung Batu, Desa Loa Raya, Desa Perjiwa, dan Desa Teluk Dalam. Pada semester I tahun 2018, arah angin dominan yaitu ke arah barat dan barat laut sehingga emisi SO₂ dan NO₂ juga bergerak ke arah barat dan barat laut menuju Desa Tanjung Batu, Desa Loa Tebu, Desa Loa Ulung, Desa Loa Pari, dan Desa Loa Raya dimana pemukiman penduduk terdapat di Desa Tanjung Batu, Desa Loa Tebu, Desa Loa Ulung, dan Desa Loa Pari. Pada semester II tahun 2018, arah angin dominan yaitu ke arah selatan sehingga emisi SO₂ dan NO₂ juga bergerak ke arah selatan menuju Desa Tanjung Batu, Desa Loa Raya, Desa Perjiwa, dan Desa Bukit Raya dimana pemukiman penduduk terdapat di Desa Tanjung Batu, Desa Loa Raya, Desa Perjiwa, dan Desa Teluk Dalam.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis terhadap konsentrasi dan sebaran SO₂ dan NO₂ dari cerobong GT2 PLTGU Tanjung Batu diperoleh kesimpulan-kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil perhitungan konsentrasi emisi SO₂ dan NO₂ berdasarkan tinggi semburan (Δh) dari Persamaan Holland dan Persamaan Briggs menunjukkan bahwa konsentrasi pada jarak reseptor 1000 m, konsentrasi dari Persamaan Holland memiliki nilai yang lebih tinggi daripada konsentrasi dari Persamaan Briggs. Hal ini disebabkan karena Briggs mempertimbangkan adanya *buoyancy flux* dan ketinggian semburan maksimum sehingga konsentrasi yang dihasilkan lebih kecil daripada konsentrasi yang dihasilkan oleh Holland. Sementara pada jarak 2000-5000 m, konsentrasi SO₂ dan NO₂ dari Persamaan Holland dan Persamaan Briggs menunjukkan nilai yang kurang lebih sama satu sama lain.
2. Perhitungan konsentrasi SO₂ dan NO₂ dari Persamaan Holland dan Persamaan Briggs di semester I tahun 2017, semester II tahun 2017, semester I tahun 2018, dan semester II tahun 2018 pada jarak reseptor 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m, dan 5000 m masih berada di bawah baku mutu sesuai Peraturan Pemerintah RI Nomor 41 Tahun 1999 sehingga aman bagi lingkungan.
3. Berdasarkan peta sebaran emisi menunjukkan daerah paparan emisi SO₂ dan NO₂ dari sumber emisi hingga jarak reseptor 5000 m adalah Desa Tanjung Batu, Desa Loa Ulung, Desa Loa Pari, Desa Loa Raya, Desa Perjiwa, Desa Teluk Dalam, Desa Bukit Raya, dan Desa Loa Tebu. Dispersi emisi SO₂ dan NO₂ di tahun 2017 dan 2018 dipengaruhi oleh arah angin dominan di tahun 2017 dan 2018. Pada semester I tahun 2017, arah angin dominan yaitu ke arah barat sehingga emisi SO₂ dan NO₂ juga bergerak ke arah barat menuju



Desa Tanjung Batu, Desa Loa Ulung, Desa Loa Pari, dan Desa Loa Raya dimana pemukiman penduduk terdapat di Desa Loa Pari. Pada semester II tahun 2017, arah angin dominan yaitu ke arah selatan sehingga emisi SO_2 dan NO_2 juga bergerak ke arah selatan menuju Desa Tanjung Batu, Desa Loa Raya, Desa Perjiwa, Desa Teluk Dalam, dan Desa Bukit Raya di mana pemukiman penduduk terdapat di Desa Tanjung Batu, Desa Loa Raya, Desa Perjiwa, dan Desa Teluk Dalam. Pada semester I tahun 2018, arah angin dominan yaitu ke arah barat dan barat laut sehingga emisi SO_2 dan NO_2 juga bergerak ke arah barat dan barat laut menuju Desa Tanjung Batu, Desa Loa Tebu, Desa Loa Ulung, Desa Loa Pari, dan Desa Loa Raya dimana pemukiman penduduk terdapat di Desa Tanjung Batu, Desa Loa Tebu, Desa Loa Ulung, dan Desa Loa Pari. Pada semester II tahun 2018, arah angin dominan yaitu ke arah selatan sehingga emisi SO_2 dan NO_2 juga bergerak ke arah selatan menuju Desa Tanjung Batu, Desa Loa Raya, Desa Perjiwa, Desa Teluk Dalam, dan Desa Bukit Raya dimana pemukiman penduduk terdapat di Desa Tanjung Batu, Desa Loa Raya, Desa Perjiwa, dan Desa Teluk Dalam.

Referensi

- Abidin, Jainal dan Acep Purqon., 2016, Pemodelan Polusi Udara dengan Gaussian Plume, *Prosiding SNIPS 2016*, ISBN: 978-602-61045-0-2, pp 444-452, SNIPS 2016, Bandung.
- Assegaf, Alimuddin Hamzah., 2018, *Pemodelan Dispersi Gas dari Cerobong PLTU dengan Model Pasquill-Gaussian*, Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan Vol. 8 No. 3 (Desember 2018), pp 414-419, PUSLITBANG-LH dan Departemen Geofisika FMIPA Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Cahyono, Tri., 2017, *Penyehatan Udara*, Penerbit ANDI, Yogyakarta.
- Damayanti, Rissa, Puji Santoso, dan Hana Subhiyah., 2019, *Analisis Perhitungan Ketinggian Cerobong pada Aeat 10 MeV dengan Kondisi tanpa Sistem Ventilasi*, PRIMA, Volume 16 Nomor 1 (Juni 2019), pp 11-16, Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir – BATAN, Tangerang Selatan.
- Esberto, Miguel B., Jemuel J.C. Austria, dan Zosimo F. Sarmiento., 2005, *WellTaPPS, A Web-Based Oracle Database Wellbore Temperature and Pressure Plotting Software*, Proceedings World Geothermal Congress, Turkey.
- Kurniawan, Rahmat dan Mufi Hazwi., *Analisa Performa Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) Sicanang Belawan*, Jurnal E-Dinamis, Volume 10 No. 2, pp 101-107, Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Lazaridis, Mihalios., 2011, *First Principles of Metereology and Air Pollution*, Springer, London.
- Liandy, Maria Katherina Gnadia, Endro Suswantoro, dan Hernani Yulinawati., 2015, *Analisis Sebaran Total Suspended Particulate (TSP), Sulfur Dioksida (SO_2), dan Nitrogen Dioksida (NO_2) di Udara Ambien dari Emisi Pembangkit Listrik Tenaga UAP (PLTU) Banten 3 Lontar dengan Model Gaussian*, JTL Vol. 7 No. 2 Des 2015, pp 47-56, Universitas Trisakti, Jakarta.
- Lusiani dan Teguh Wardoyo., 2017, *Analisis Arah dan Kecepatan Angin dengan Aplikasi WRPLOTS*, Jurnal Ilmu-ilmu Kemaritiman, Manajemen, dan Transportasi, Volume XV Nomor 25, pp 19-29, Bahari Jogja, Yogyakarta.
- Mukono, HJ., 2011, *Aspek Kesehatan Pencemaran Udara*, Airlangga University Press, Surabaya.
- Nauli, Tigor., 2002, *Pola Sebaran Polutan dari Cerobong Asap*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, ISSN 0216-3128, pp 313-320, Yogyakarta.
- Nevers, Noel de., 2000, *Air Pollution Control Engineering Second Edition*, McGraw-Hill, Boston.
- Ruhiat, Yayat., 2009., *Model Prediksi Distribusi Laju Penyebaran Sulfur Dioksida (SO_2) dan Debu dari Kawasan Industri (Studi Kasus Kota Cilegon)*, Disertasi, Klimatologi Terapan, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Sastrawijaya, A. T., 1991, *Pencemaran Lingkungan*, Rineka Cipta, Jakarta.
- Sumantri, Arif., 2010, *Kesehatan Lingkungan*, Kencana, Depok.
- Turner, D. Bruce., 1994, *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimate: An Introduction to Dispersion Modeling*, CRC Press, Florida.
- Wahana Komputer., 2014, *Sistem Informasi Geografis menggunakan ArcGis.*, PT. Elex Media Komputindo, Jakarta.
- Wardoyo, Arinto Y. P., 2016, *Emisi Partikulat Kendaraan Bermotor dan Dampak Kesehatan*, UB Press, Malang.
- Whardana, Whisnu Arya., 2001, *Dampak Pencemaran Lingkungan*, ANDI, Yogyakarta.