

PEMODELAN DISPERSI GAS DARI CEROBONG PLTU DENGAN MODEL PASQUIL-GAUSSIAN

Gas Dispersion Modeling from the Chimney Power Plant Pasquil-Gaussian Model

Alimuddin Hamzah Assegaf

Pusat Penelitian dan Pengembangan Lingkungan Hidup (PUSLITBANG-LH) dan Departemen Geofisika FMIPA, Universitas Hasanuddin, Kampus UNHAS Tamalanrea, Jl. Perintis km. 10, Makassar, 90245 – alihamzah@science.unhas.ac.id

Abstract. *Modern gaussian dispersion gas model such as AERMOD, CULPUFF and other are available and accepted as standard model. However, such models still difficult to implement in Indonesia where profile meteorological only available in some limited areas. In this study we propose simple gaussian model based on Pasquil stability that required simple meteorological data. Classical Pasquil-Gaussian dispersion gas model can be used as a first approach before using standard model. This model only need surface meteorological data. It does not require profile meteorological data, which is only available in certain part of Indonesia. This paper describes construction of Gaussian Plume model based on Pasquil stability principle. The model is designed to simulate gas dispersion such as SO₂ emitted by stack. Both receptor and stack were setup in the geographical cartesian grid. Terreain was assumed to be flat. Hourly surface meteorological data such as wind velocity and direction, temperature and atmospheric stability is setup as an input. The results of annual and highest averaged (1, 3, 8 and 24 hours) then displayed in contour and compared with the standard AERMOD model.*

Keywords: *AERMOD, gaussian dispersion model, pasquil stability.*

(Diterima: 05-05-2017; Disetujui: 29-11-2017)

1. Pendahuluan

Sekarang ini telah tersedia berbagai ragam model untuk mensimulasikan dispersi polutan di udara. Mulai dari model Gaussian berbasis kelas kestabilan udara atau model berbasis kestabilan kontinu sampai pada model berbasis *computational fluid Dynamics* (CFD) yang menyelesaikan Reynolds Averaged Navier-Stokes equation (RANS-3D). Model CFD unggul karena ketepatannya dalam menyelesaikan aliran fluida apabila syarat batas dapat diterapkan dengan benar. Walau demikian penerapan syarat batas untuk kasus dispersi polutan di udara bukanlah hal mudah. Alih-alih mendapatkan akurasi yang tinggi, tetapi karena penerapan syarat batas yang salah, hasil yang diperoleh malah sebaliknya. Lain halnya dengan model Gaussian yang tidak memerlukan penerapan syarat batas, sehingga mudah dalam penerapan. Dalam model Gaussian paling sederhana pun, faktor-faktor yang mewakili karakteristik atmosfer telah tercakup di dalamnya. Tidak mengherankan Amerika dan beberapa negara Eropa, Australia dan Canada mengadopsi model berbasis Gaussian *plume* seperti ISC-3, AERMOD, dan CALPUFF sebagai model resmi dalam assesmen dispersi polusi udara pada industri (US Environmental Protection Agency, 1998). Model semacam ini mewakili model Gaussian terkini dan dapat mensimulasikan berbagai kondisi seperti *fumigation, complex terrain, down-wash, deposition, trapped plume*. Walaupun demikian terdapat tantangan dalam penggunaan model ini, yakni diperlukan penyiapan data meteorologi yang tergolong rumit, terutama penyiapan data *upper air* yang diperlukan untuk menghitung kestabilan

atmosfir secara kontinu yang berbasis pada teori similaritas. Sayangnya, data semacam itu hanya tersedia pada beberapa bandara utama di Indonesia. Kendala ini dapat diatasi dengan pemanfaatan data prognostik yang dihasilkan oleh model meteorology global seperti MM5 atau WRF (Grell *et al.*, 1994). Namun sekali lagi diperlukan upaya dalam mensetup model semacam ini. Penyiapan data meteorologi telah dilakukan negara berkembang seperti di Malaysia (Chen *et al.*, 2011). Mereka sudah mulai memanfaatkan data pengukuran stasiun meteorologi lokal untuk simulasi dispersi polusi udara. Hal demikian belum dilakukan di Indonesia. Oleh karena itu dalam keadaan tertentu diperlukan model sederhana sebagai pengganti yang dapat berfungsi sebagai perhitungan awal atau pun screening dan model yang lebih teliti dapat diterapkan kemudian, bila dipandang perlu.

Makalah ini memaparkan konstruksi model Gaussian *plume* sederhana berbasis kelas kestabilan atmosfer (Pasquill, 1961; Gifford, 1961). Konsep dasar yang dikemukakan mirip dengan yang dikemukakan pada berbagai buku teks standar dalam pemodelan pencemaran udara yang pada dasarnya bersumber pada formula Briggs (Briggs, 1975). Walau demikian literatur tersebut umumnya hanya memuat metodologi perhitungan untuk kasus satu sumber dan satu arah mata angin (Beychok, 2005; De Visscher, 2014; Lazaridis, 2011). Padahal dalam kenyataannya, dalam suatu kompleks pabrik/*plant* kadang terdapat lebih dari satu cerobong dan angin datang dari berbagai arah dengan kecepatan beragam.

Tujuan yang hendak dicapai dalam studi ini adalah merancang model dispersi polutan udara sederhana

berdasarkan kestabilan Pasquill yang dapat memenuhi kebutuhan pemodelan dispersi gas, manakala data meteorologi profile tidak tersedia. Model ini dapat digunakan pada tahap *screening* dengan input data meteorologi terbatas. Pada tahap ini akurasi tidaklah terlalu diutamakan, perhatian lebih ditujukan untuk mendapatkan gambaran secara cepat tentang arah dan luas penyebaran polutan. Informasi ini, kemudian dapat dijadikan panduan dalam penetapan titik sampling kualitas udara dan batas area studi untuk parameter lingkungan kualitas udara. Untuk mendapatkan hasil perhitungan dengan tingkat ketelitian lebih tinggi disarankan untuk menggunakan model standar. Model ini dapat pula digunakan sebagai alat pengajaran dispersi polutan di udara. Sebagai studi kasus, maka model ini akan diterapkan pada simulasi penyebaran gas SO₂ pada cerobong PLTU di Bolaan Mangondow dimana tidak tersedia data meteorologi profile dan kondisi topografi relatif datar. Hasil perhitungan selanjutnya dibandingkan dengan perolehan AERMOD sebagai model standar.

2. Metode

2.1. Stabilitas Atmosfir

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.

Tabel 1. Penentuan kelas kestabilan atmosfer [10]

u (m/s)	Siang			Malam	
	Radiasi Matahari			Sifat Awan	
	Kuat	sedang	kecil	berawan (≥4/8)	Cerah (≤3/8)
< 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

Oleh karena kecepatan angin (*u*) berubah terhadap ketinggian, maka kecepatan angin pada cerobong (*u_s*) perlu dikoreksi dengan hukum logaritmik berikut:

$$\frac{u_s}{u} = \left(\frac{h_s}{h_g}\right)^n \tag{1}$$

h_g adalah tinggi stasiun pengukur angin permukaan (biasanya 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 (Beychok, 2005).

Kelas Stabilitas	A	B	C	D	E	F
------------------	---	---	---	---	---	---

<i>n</i> (rural)	0.10	0.15	0.20	0.25	0.25	0.30
<i>n</i> (urban)	0.15	0.15	0.20	0.25	0.40	0.60

2.2. Model Dispersi Gaussian

Model dispersi 2-D tipe Gaussian dapat dituliskan sebagai berikut:

$$C = \frac{Q}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \times \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z-H_e)^2}{\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z+H_e)^2}{\sigma_z^2}\right) \right\} \tag{2}$$

Dimana: *Q* adalah laju emisi ($\mu\text{g/s}$), *u_s* adalah kecepatan efektif angin pada cerobong (m/s), (σ_y, σ_z) menyatakan koefisien dispersi dalam arah *y* dan *z* (m), *y* adalah posisi reseptor dalam arah *y* (m), *z* adalah ketinggian reseptor (m) dan *H_e* adalah tinggi cerobong efektif (m). *C* adalah konsentrasi polutan di permukaan (*Ground Level Concentration, GLC*) dalam ($\mu\text{g/m}^3$).

Mempertimbangkan faktor kekasaran permukaan, maka koefisien dispersi dikategorikan dalam dua wilayah: *rural* dan *urban*. Wilayah *urban* dicirikan dengan banyaknya gedung-gedung yang mempengaruhi koefisien kekasaran, sebaliknya wilayah *rural* didominasi oleh pepohonan yang relatif mempunyai tingkat kekasaran lebih rendah.

Koefisien dispersi dalam arah *y* dan *z* untuk wilayah *rural* didekati dengan ekspresi berikut (Beychok, 2005):

$$\sigma = (\sigma_y, \sigma_z) = \exp[\alpha + \beta \ln(x) + \gamma \ln(x)^2] \tag{3}$$

x adalah jarak down-wind antara source dan reseptor (km). Nilai koefisien (α, β, γ) diberikan pada Tabel-3:

Tabel 3. Nilai koefisien pada persamaan (3) (Beychok, 2005)

Kestabilan Pasquill	untuk σ_z			untuk σ_y		
	α	β	γ	α	β	γ
A	6.035	2.1097	0.2770	5.357	0.8828	-0.0076
B	4.694	1.0629	0.0136	5.058	0.9024	-0.0096
C	4.110	0.9201	-0.0020	4.651	0.9181	-0.0076
D	3.414	0.7371	-0.0316	4.230	0.9222	-0.0087
E	3.057	0.6794	-0.0450	3.922	0.9222	-0.0064
F	2.621	0.6564	-0.0540	3.533	0.9191	-0.0070

Koefisien dispersi dalam arah *y* dan *z* untuk wilayah *urban* didekati dengan ekspresi berikut (Beychok, 2005):

$$\sigma = (\sigma_y, \sigma_z) = \alpha x(1 + \beta x)^\gamma \tag{4}$$

Nilai koefisien (α, β, γ) diberikan pada Tabel-4.

Tabel 4. Nilai koefisien pada persamaan (4) (Beychok, 2005)

Kestabilan Pasquill	untuk σ_z			untuk σ_y		
	α	B	γ	α	β	γ
A	240.0	1.0	0.5	320.0	0.4	-0.5
B	240.0	1.0	0.5	320.0	0.4	-0.5
C	200.0	0.0	0.0	220.0	0.4	-0.5
D	140.0	0.3	-0.5	160.0	0.4	-0.5
E	80.0	1.5	-0.5	110.0	0.4	-0.5
F	80.0	1.5	-0.5	110.0	0.4	-0.5

2.3. Bouyancy dan Tinggi Kepulan (*Plume Rise*)

Tinggi kepulan kemungkinan disebabkan oleh: *bouyancy* (pada *exhaust* gas panas) dan momentum (pada *exhaust* dengan kecepatan tinggi). Biasanya

kontribusi momentum relatif kecil dan dapat diabaikan. *Bouyancy* yang muncul dari perbedaan temperatur relasinya dituliskan:

$$F = \frac{1}{4} g u_s d^2 \left(1 - \frac{T}{T_s} \right) \quad (5)$$

d adalah diameter dalam cerobong (m), T_s : temperatur gas pada cerobong ($^{\circ}\text{K}$) dan T adalah temperatur udara ambien ($^{\circ}\text{K}$).

Dalam rangka perhitungan tinggi keputan diperkenalkan parameter stabilitas S untuk mengkategorisasikan pengaruh turbulen atmosfer pada plume rise sebagai fungsi dari gradien temperatur potensial (Tabel-5):

$$S = \frac{g}{T} \left(\frac{d\theta}{dz} \right) \quad (6)$$

Tabel 5. Gradien temperatur potensial (Beychok, 2005)

Kelas Stabilitas	A	B	C	D	E	F
$d\theta/dz$	-0.009	-0.008	-0.006	0.000	0.015	0.025

Ketika gradien potensial temperatur positif, *restoring force* beraksi untuk menurunkan kembali parcel udara yang terangkat dengan meredam turbulensi atmosfer dan menciptakan kestabilan atmosfer. Sebaliknya gradien temperatur negatif akan meningkatkan turbulensi dan menciptakan ketidakstabilan atmosfer. Gradien potensial nihil tidak akan meredam atau meningkatkan turbulensi, sehingga akan menciptakan atmosfer netral (Lazaridis, 2011).

Secara umum tinggi keputan dihitung dengan rumus (Turner, 1994):

$$\Delta h = \frac{1.6}{u} F^{1/3} x^{2/3} \quad (7)$$

Terlihat bahwa tinggi keputan meningkat seiring penambahan jarak reseptor. Walaupun demikian, tinggi keputan tidak akan meningkat terus-menerus, tetapi akan stabil pada ketinggian tertentu. Ketinggian ini dicapai pada jarak x_f dari source (Hanna *et al.*, 1982):

$$x_f = \begin{cases} 49F^{5/8} & F \geq 55 \\ 119F^{2/5} & F < 55 \end{cases} \quad (8)$$

Untuk itu tinggi keputan (pers.7) pada $x > x_f$ dimodifikasi sebagai berikut (Beychok, 2005):

$$\Delta h = \begin{cases} 38.71 \frac{F^{3/5}}{u_s} & F \geq 55 \\ 21.425 \frac{F^{3/4}}{u_s} & F < 55 \end{cases} \quad (9)$$

Khusus untuk kondisi atmosfer yang termasuk dalam kelas E dan F, maka x_f dimodifikasi dengan (Beychok, 2005)

$$x_f = 1.84 \frac{u_s}{\sqrt{S}} \quad (10)$$

dan tinggi keputan untuk $x > x_f$ pada kelas E dan F dihitung dengan (Beychok, 2005):

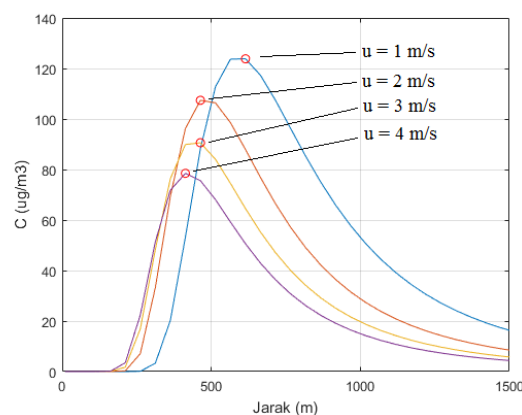
$$\Delta h = 2.4 \left(\frac{F}{u_s S} \right)^{1/3} \quad (11)$$

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

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

Dengan: h_s menyatakan tinggi cerobong (m), Δh : tinggi keputan (m) dan z : ketinggian reseptor (m). Pada dasarnya persamaan hanya berlaku untuk kondisi flat ($z=0$). Walaupun demikian, dapat saja diperhitungkan ketinggian reseptor jika ketinggiannya kurang dari 10% dari ketinggian cerobong (relatif datar) (Beychok, 2005). Untuk kasus *complex terrain*, maka diperlukan formula khusus untuk menangani kasus ini (US Environmental Protection Agency, 1998).

Persamaan dispersi polutan (pers. 2) mengindikasikan bahwa penambahan kecepatan angin akan menurunkan konsentrasi, tetapi persamaan tinggi keputan menunjukkan hal sebaliknya (Gambar 1). Oleh karena itu, terdapat suatu kecepatan angin tertentu yang menghasilkan konsentrasi maksimum. Kecepatan ini biasa disebut kecepatan kritis. Konsep ini penting dalam screening, karena mewakili skenario *worst-case* dari emisi cerobong.



Gambar 1. Pengaruh variasi kecepatan angin terhadap konsentrasi

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Implementasi

Misalkan posisi absolut reseptor dan source (cerobong) adalah (x_R, y_R) dan (x_S, y_S) , maka posisi relatif reseptor terhadap source dinyatakan oleh:

$$x = (y_S - y_R) \cos \psi + (x_S - x_R) \sin \psi \quad (13)$$

$$y = (y_S - y_R) \sin \psi - (x_S - x_R) \cos \psi$$

ψ adalah sudut datang angin terhadap utara. Jarak relatif (dalam arah *down-wind*) antara cerobong dan reseptor adalah:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (14)$$

Sehingga dalam perhitungan semua nilai x digantikan dengan r yang menyatakan jarak relatif reseptor terhadap source. Pada saat membuat *contour plot*, maka kembali digunakan koordinat absolut (x_R, y_R) untuk menyatakan posisi absolut reseptor.

Data meteorologi yang terdiri atas: tahun, bulan, tanggal, *Julian date*, jam, kecepatan angin (m/s), arah angin (deg), temperatur udara ambien ($^{\circ}\text{K}$) dan stabilitas atmosfer (1~6), yang direlasikan dengan (A, B, C, D, E, dan F), disimpan dalam format excel. Penentuan ke-

las stabilitas atmosfer pada Tabel-1. Diperlukan perhitungan pendahuluan dalam penentuan kelas atmosfer dan dengan menyimpan data atmosfer dalam format excel, maka perhitungan dapat dilakukan dengan cepat.

Data cerobong yang diperlukan adalah: jumlah cerobong, posisi (x_s, y_s) dalam m, tinggi (m), diameter dalam (m), temperatur gas ($^{\circ}K$), laju emisi ($\mu g/s$), dan kecepatan semburan gas (m/s).

Data reseptor diset berupa grid mesh seragam (dapat pula tidak seragam) yang menunjukkan posisi dan ketinggian (x_R, y_R, z_R) dalam m. Untuk memudahkan, posisi cerobong diset sebagai pusat mesh. Kondisi topografi dianggap datar.

3.2. Studi Kasus: Dispersi gas SO₂ dari Cerobong PLTU

Untuk menguji model yang dikonstruksi - dalam hal ini akan disebut "model-GP" - maka akan disandingkan dengan model AERMOD yang merupakan model standar yang digunakan sebagai model uji (*regulated model*) di Amerika Serikat, Kanada, Selandia Baru dan beberapa negara eropa dalam proses perizinan emisi. AERMOD dan model-GP digunakan untuk mensimulasikan emisi gas SO₂ yang diemisikan oleh PLTU yang terletak di Kabupaten Bolaan Mangondow Utara seperti terlihat pada Gambar 2. Kondisi topografi relatif datar dan didominasi perkebunan kelapa sawit. PLTU ini memiliki dua cerobong. Data kedua cerobong adalah identik, kecuali posisinya. Deskripsi cerobong diperlihatkan pada Tabel-6.

AERMOD dan model GP disetup semirip mungkin dengan kondisi *terrain* yang ideal. Pada kedua model ini diasumsikan: wilayah rural, tidak terjadi fumigation, topografi dianggap flat. Tipe gas yang akan disimulasikan adalah sulfur dioksida (SO₂). Reseptor disetar pada grid 100x100 dengan spasi seragam 100 m, sehingga luas area komputasi adalah 10x10 km².

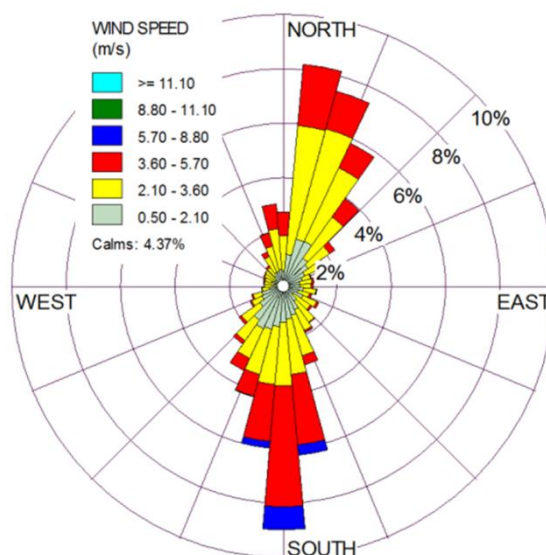
Data meteorologi yang digunakan adalah jam-jaman selama tahun 2015 yang pada mulanya diperuntukkan sebagai input pada AERMOD. Model-GP hanya menggunakan data meteorologi permukaan yang kemudian disederhanakan dengan menghilangkan bagian yang tidak diperlukan. Data digunakan merupakan data yang didominasi oleh angin utara selatan seperti terlihat pada mawar angin yang diperlihatkan oleh Gambar 3. Kecepatan angin rata-rata adalah 2.34 m/s dengan kecepatan dominan 2.1~3.6 m/s sebanyak 41% dan calm wind 4.37%.



Gambar 2. Lokasi PLTU yang dijadikan objek studi. Terletak di Kabupaten Bolaan Mangondow, Propinsi Sulawesi Utara

Tabel 6. Parameter Cerobong

Parameter cerobong	Nilai
Posisi Cerobong	Cerobong #1: $x_1 = 552418.2779$ m, $y_1 = 98398.6386$ m
	Cerobong #2: $x_2 = 552407.3157$ m, $y_2 = 98400.5013$ m
Tinggi cerobong	100 m
Diameter Dalam	3 m
Flow rate	87.5 m ³ /s
Stack gas exit temperature	150 $^{\circ}C$
Gas exit velocity	12.379 m/s
Base elevation	10.45 m
SO ₂ Emission	73 g/s

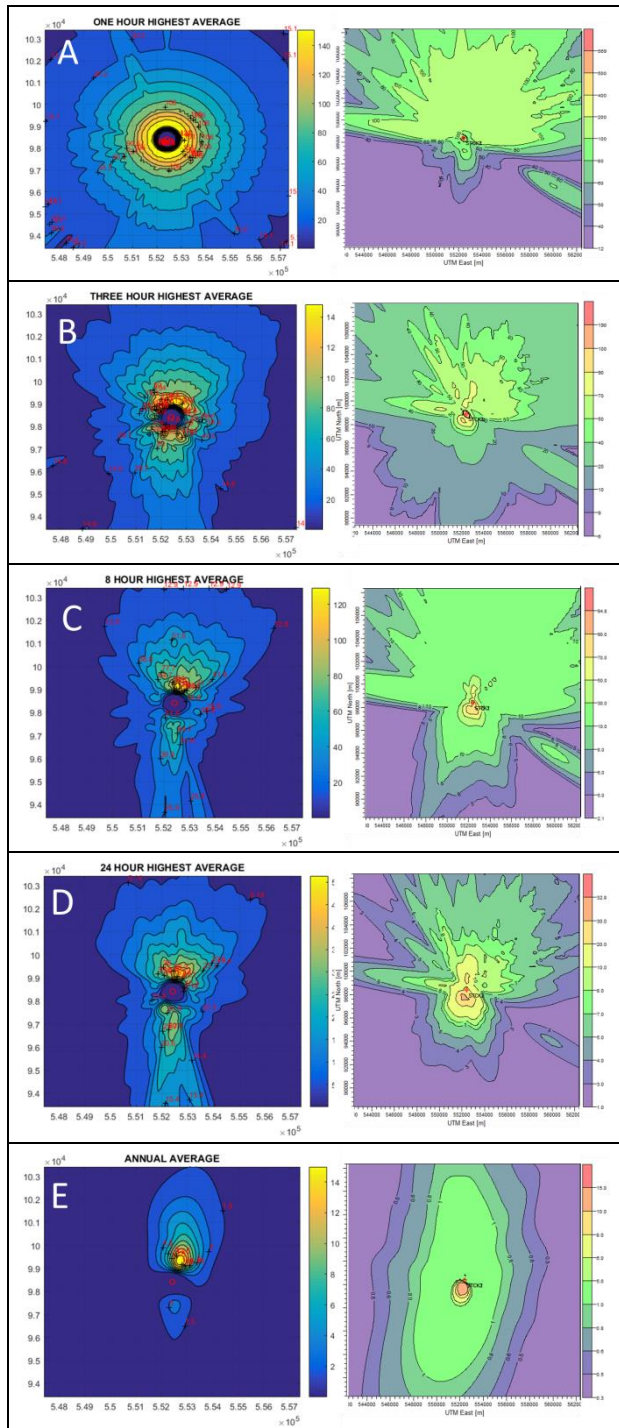


Gambar 3. Mawar angin dari data meteorologi yang digunakan sebagai input model

Gambar 4 menunjukkan perbandingan hasil perhitungan model-GP dan AERMOD untuk beberapa waktu perata-rataan. Secara umum terdapat kecenderungan arah penyebaran yang mirip. AERMOD memberikan hasil yang lebih terdispersi, terutama pada perata-rataan 1 jam dan rata-rata tahunan. Konsentrasi maksimum yang terangkum pada Tabel-6 menunjukkan bahwa model-GP *under-estimate* pada perata-rataan 1 jam dan *over-estimate* pada perata-rataan 8 jam. Pada kasus perata-rataan 3 dan 24 jam, serta annual relatif lebih sesuai dengan hasil AERMOD.

Tabel 6. Perbandingan Hasil Perhitungan Konsentrasi Maksimum

Nilai Maksimum ($\mu g/s$)	Model GP	AERMOD
Highest 1 hour average	165.95	569
Highest 3 hours average	163.10	190
Highest 8 hours average	142.36	94.8
Highest 24 hours average	56.54	32.8
Annual	16.49	15

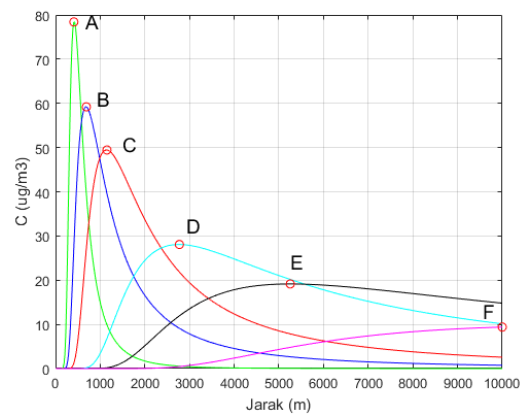


Gambar 4. Perbandingan Hasil Perhitungan model-GP dan AERMOD: (A) 1 jam rata-rata tertinggi; (B) 3 jam rata-rata tertinggi; (C) 8 jam rata-rata tertinggi; (D) 24 jam rata-rata tertinggi; (E) Rata-rata tahunan

Secara teoritik, model-GP sangat sensitif terhadap kelas kestabilan. Atmosfir dengan kelas kestabilan A akan mempunyai puncak dispersi di dekat sumber dan relatif lebih besar dibandingkan kelas lain, tetapi cepat meluruh. Lain halnya dengan kestabilan F yang mempunyai puncak terjauh dari sumber tetapi mempunyai laju peluruhan yang paling terkecil (lihat Gambar 5). Kelas kestabilan input data model-GP sangat sensitif terhadap hasil perhitungan. Ketiadaan data radiasi matahari, ditenggarai sebagai salah satu sebab yang mempengaruhi hasil perhitungan. Oleh

karena itu penggunaan Tabel-1 untuk menentukan kelas kestabilan perlu dilakukan dengan penuh kehati-hatian.

Model AERMOD mempertimbangkan aspek refleksi dan dispersi vertikal dipandang sebagai proses bi-gaussian. Parameter meteorologi yang memerlukan turbulensi yang digunakan juga lebih lengkap seperti: kecepatan kekasaran (*friction velocity*), skala kecepatan konvektif (*convective velocity scale*), tinggi lapisan batas (*mechanical and convective boundary layer height*) dan *monin-obukhov length* (Cimorelli *et al.*, 2005). Semua parameter ini digunakan dalam formulasi koefisien dispersi. Dengan demikian karakteristik atmosfer terperikan dengan lebih baik, sehingga penentuan nilai koefisien yang terlibat dalam perhitungan dapat dilakukan dengan lebih baik. Dalam model-GP koefisien dispersi tidak mempertimbangkan aspek turbulensi yang ditimbulkan oleh kekasaran dan radiasi matahari. Aspek ini hanya dikategorisasikan dengan kestabilan pasquill. Walaupun demikian, keunggulan model-GP pada penyiapan data meteorologi yang sederhana, sehingga dapat diterapkan pada daerah terpencil di Indonesia.



Gambar 5. Pola dispersi polutan pada kecepatan angin yang sama, tetapi dengan beragam kelas kestabilan

4. Kesimpulan

Model yang dikembangkan dari asumsi Gaussian plume versi Pasquill memberikan hasil yang mengembirakan. Walaupun dengan keterbatasan data meteorologi dan kesederhanaan asumsi yang digunakan, tetapi hasil yang diberikan dapat mengikuti kecenderungan hasil perhitungan model standar AERMOD. Hasil simulasi dispersi SO₂ yang diemisikan oleh PLTU, menunjukkan bahwa model tidak akurat untuk nilai konsentrasi tertinggi (rata-rata 1~24 jam), tetapi cukup akurat untuk nilai rata-rata tahunan. Walaupun, akurasi perhitungan lebih rendah dibandingkan model standar, tetapi model ini menjanjikan untuk dapat dikembangkan lebih lanjut.

Daftar Pustaka

- [1] Beychok M.R. (2005). Fundamentals of Stack Gas Dispersion, 4th ed. Beychok, Newport Beach, CA.
- [2] Briggs G.A. (1975). Plume rise predictions. In Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses. American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 59–111.

- [3] Cimorelli, A. J. et. al., 2005: AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Application. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization, *Journal of Applied Meteorology* 44, 682-693.
- [4] De Visscher A. (2014). Air dispersion modeling: foundations and applications, John Wiley & Sons.
- [5] G. A. Grell, J. Dudhia and D. R. Stauffer, 1994: A Description of the fifth generation Penn State/ NCAR mesoscale model (MM5), NCAR Tech Note, NCAR/TN-398+STR, 117.
- [6] Gifford F.A. (1961). Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion. *Nuclear Safety* 2, 47-51
- [7] Hanna S.R., Briggs, G.A. and Hosker, R.P. (1982). *Handbook on Atmospheric diffusion*. U.S. Department of Energy.
- [8] Lazaridis M. (2011). *First Principle of Meteorology and Air Pollution*, Environmental Pollution 19. Springer.
- [9] Pasquill F. (1961). Estimation of the dispersion of windborne material. *Meteorol. Mag.* 90, 33-49
- [10] T. Y. Chen, L. C. Abdullah and T. P. Aun, "Preparation of meteorological input for AERMOD using Malaysian meteorological data," *2011 Fourth International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization*, Kuala Lumpur, 2011, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICMSAO.2011.5775472
- [11] Turner D.B. (1994). *Workbook of atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modeling*, 2nd ed. CRC Press.
- [12] US Environmental Protection Agency, (1998): *AERMOD: Revised Draft – User’s Guide for the AMS/EPA Regulatory Model – AERMOD*. Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC.