



Model Matematika Persebaran Polutan dari Cerobong Kilang Pertamina RU V Balikpapan

Muliady Faisal*

Program Studi Matematika, Jurusan Matematika dan Teknologi Informasi, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia

*Penulis Korespondensi: muliadyfaisal@lecturer.itk.ac.id

Received: 30/08/2026 | Accepted: 02/10/2026 | Publication: 05/10/2026

Abstract: Air pollution from industrial stacks is a major environmental concern in Balikpapan, where the Pertamina Refinery Unit V (RU V) is one of the largest refineries outside Java. This study derives the Gaussian plume model from the steady-state advection-diffusion equation using the Laplace transform and applies it to three RU V stacks (CDU IV, HVU II, and HCU) to estimate ground-level concentrations of particulate matter, SO_2 , and NO_2 . Stack parameters and measured emission concentrations were obtained from the refinery, and 2021 wind records from the Indonesian Agency for Meteorology, Climatology, and Geophysics (BMKG). A mean daily-maximum wind speed of 3.7 m/s and moderate insolation indicated Pasquill-Gifford stability classes B and C. Concentrations were calculated using Briggs buoyant plume rise and rural dispersion coefficients, and compared with the US EPA SCREEN3-based software ScreenView. Maximum ground-level concentrations occurred 990–1,630 m downwind under class B and 1,670–2,970 m under class C. The highest single-stack values were $0.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for particulate matter, $16.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for SO_2 , and $20.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for NO_2 . ScreenView gave maxima 4–11% lower and located 11–20% farther downwind, which is explained by differences in wind speed at stack height, plume rise, and dispersion coefficients. Superposition of the three plumes produced combined maxima of $26.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for SO_2 and $46.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for NO_2 , well below the one-hour ambient standards of Government Regulation No. 22 of 2021 (150 and $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$). The study offers a transparent analytical framework for screening-level assessment of refinery emissions; field validation remains necessary.

Keywords: Gaussian Plume; Air Pollution Dispersion; Laplace Transform; Atmospheric Stability; Refinery Emissions



Copyright © 2026, The Author(s).

This is an open-access article under the CC-BY-SA license.

How to Cite: Faisal, M. (2026). Model matematika persebaran polutan dari cerobong kilang Pertamina RU V Balikpapan. *Journal of Innovation Research and Knowledge*, 6(5), 2893–2903. <https://doi.org/10.53625/jirk.v6i5.13395>

PENDAHULUAN

Pencemaran udara dari sumber industri tetap menjadi persoalan lingkungan dan kesehatan masyarakat di wilayah perkotaan. Paparan polutan udara luar ruangan dikaitkan dengan gangguan saluran pernapasan, penyakit kardiovaskular, dan kematian dini (Manisalidis *et al.*, 2020; World Health Organization [WHO], 2021). Sulfur dioksida (SO_2), nitrogen dioksida (NO_2), dan partikulat merupakan polutan utama dari pembakaran bahan bakar fosil pada industri pengolahan minyak bumi (Seinfeld & Pandis, 2016).

Sejak pengeboran minyak pertama pada 1897, Kota Balikpapan tumbuh menjadi

pusat industri pengolahan minyak di luar Pulau Jawa. Kilang Pertamina Refinery Unit (RU) V berada di sisi barat Teluk Balikpapan dan menjadi salah satu kilang terbesar di Indonesia. Peraturan Daerah Kota Balikpapan Nomor 6 Tahun 2021 tentang RPJMD 2021–2026 mencatat bahwa aktivitas pengilangan ini menyumbang 69,30% emisi gas rumah kaca sektor energi dan transportasi dan 66,85% dari total emisi kota pada tahun 2010 (Pemerintah Kota Balikpapan, 2021). Karena emisi cerobong dibawa angin hingga mencapai reseptor di permukaan, pemahaman tentang konsentrasi yang sampai ke tanah sangat diperlukan untuk menetapkan jarak aman dan lokasi pemantauan (Edokpa & Nwagbara, 2017).

Pemodelan dispersi atmosfer menyediakan cara untuk memperkirakan konsentrasi tersebut tanpa pemantauan lapangan yang mahal dan memakan waktu (Holmes & Morawska, 2006; Leelössy *et al.*, 2014). Model regulasi seperti AERMOD (Cimorelli *et al.*, 2005) dan model penapisan SCREEN3 (US EPA, 1995) berbasis pada formulasi Gaussian. Model *Gaussian plume* tetap dipakai luas karena bentuknya tertutup, kebutuhan datanya sedikit, dan setiap asumsinya dapat ditelusuri (Turner, 1994; Visscher, 2014). Stockie (2011) menunjukkan bahwa rumus Gaussian plume dapat diturunkan secara matematis dari persamaan adveksi–difusi; namun, dalam banyak kajian terapan, rumus itu diperlakukan sebagai titik awal tanpa penurunan.

Sejumlah penelitian telah menerapkan pendekatan serupa. Abidin dan Purqon (2016) menunjukkan bahwa tinggi efektif emisi sangat menentukan konsentrasi dan jangkauan sebaran. Assegaf (2018) memodelkan dispersi gas dari cerobong PLTU dengan model Pasquill–Gaussian, sedangkan Hasibuan *et al.* (2015) mensimulasikan dispersi polutan gas dan partikulat dari pabrik semen dengan Matlab. Dewi dan June (2018) memadukan model Gauss dengan SCREEN3 pada industri semen dan menemukan konsentrasi permukaan tertinggi terjadi pada malam hari saat atmosfer stabil. Khaniabadi *et al.* (2018) membandingkan SCREEN3 dan model Gaussian dengan data ukur untuk cerobong pabrik semen dan memperoleh konsentrasi maksimum pada radius 1.600–1.800 m. Ulfah *et al.* (2018) mensimulasikan sebaran polutan dari sumber titik dengan model adveksi–difusi. Untuk Balikpapan, Faisal *et al.* (2021) menganalisis pola angin kota guna menentukan titik pemantauan kualitas udara, dan Febriyanti (2020) merekonstruksi model Gaussian plume untuk menentukan jarak aman permukiman dengan data non-aktual.

Sepengetahuan penulis, penelitian yang menggabungkan penurunan analitik model dengan data emisi aktual cerobong kilang di Balikpapan, serta membandingkan hasilnya dengan perangkat lunak berbasis standar EPA, masih terbatas. Penelitian ini bertujuan (1) menurunkan model Gaussian plume dari persamaan adveksi–difusi menggunakan transformasi Laplace; (2) menghitung konsentrasi maksimum di permukaan dan jaraknya untuk partikulat, SO₂, dan NO₂ dari tiga cerobong RU V pada kelas stabilitas B dan C; (3) membandingkan hasil perhitungan dengan ScreenView; dan (4) memetakan sebaran gabungan ketiga cerobong serta mengevaluasinya terhadap baku mutu udara ambien. Kebaruan kajian ini terletak pada pemakaian data emisi dan meteorologi aktual untuk kilang terbesar di Kalimantan Timur dalam kerangka analitik yang transparan dan dapat direplikasi.

METODE PENELITIAN***Lokasi dan data penelitian***

Sumber emisi adalah tiga cerobong kilang Pertamina RU V Balikpapan yang melayani unit CDU IV (Cerobong 1), HVU II (Cerobong 2), dan HCU (Cerobong 3). Jarak antarcerobong adalah sekitar 370 m (Cerobong 1–2), 386 m (Cerobong 1–3), dan 144 m (Cerobong 2–3). Data profil cerobong dan hasil uji emisi diperoleh dari Pertamina RU V (Tabel 1). Konsentrasi emisi dinyatakan dalam mg/Nm^3 dan telah dikoreksi pada kadar O_2 5% dalam keadaan kering. Laju emisi dihitung dengan Persamaan (10).

Tabel 1. Profil cerobong, konsentrasi emisi terukur, dan laju emisi hasil perhitungan

Parameter	Cerobong 1 (CDU IV)	Cerobong 2 (HVU II)	Cerobong 3 (HCU)
Lintang	-1,248056	-1,246889	-1,245833
Bujur	116,815833	116,819083	116,818333
Tinggi cerobong, h (m)	60	91	91
Diameter, d_s (m)	1,9	3,0	3,0
Kecepatan keluar gas, V_s (m/s)	20,59	18,34	21,78
Suhu gas, T_s (K)	469	469	469
Partikulat (mg/Nm^3)	4,99	4,99	4,99
SO_2 (mg/Nm^3)	76,39	67,12	200,61
NO_2 (mg/Nm^3)	210,25	257,59	163,89
Q partikulat (g/s)	0,291	0,647	0,768
$Q \text{ SO}_2$ (g/s)	4,457	8,697	30,900
$Q \text{ NO}_2$ (g/s)	12,305	33,376	25,219

Data meteorologi berupa kecepatan dan arah angin harian sepanjang 2021 diunduh dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Stasiun Balikpapan melalui dataonline.bmkg.go.id. Kecepatan angin yang digunakan adalah kecepatan maksimum harian pada ketinggian pengukuran 10 m. Mawar angin disusun dengan perangkat lunak WRPLOT. Suhu udara ambien ditetapkan 293 K dan tinggi reseptor 1,5 m.

Stabilitas atmosfer

Kelas stabilitas ditentukan dengan skema Pasquill–Gifford berdasarkan kecepatan angin 10 m dan intensitas radiasi matahari (Pasquill, 1961; Gifford, 1961; Visscher, 2014). Kelas stabilitas B dan C dipakai karena kedua kelas ini mewakili kondisi siang hari dengan radiasi sedang di lokasi penelitian. Karena kawasan cerobong berupa kompleks industri di pinggiran kota, koefisien dispersi yang dipakai adalah koefisien untuk daerah perdesaan (*rural*).

Penurunan model Gaussian plume

Konsentrasi polutan $C(x, y, z)$ dari sumber titik dengan laju emisi Q pada ketinggian efektif H diturunkan dengan asumsi: (i) emisi kontinu dan konstan dari sumber titik di $(0, 0, H)$; (ii) angin seragam dan konstan dengan kecepatan u searah sumbu- x ; (iii) kondisi tunak (*steady state*); (iv) difusi searah angin dapat diabaikan terhadap adveksi; (v) difusivitas pusaran bersifat isotropik dan hanya bergantung pada x , yaitu $K(x)$; (vi) permukaan tanah datar pada $z = 0$; dan (vii) polutan tidak terserap atau bereaksi di permukaan sehingga terpantul sempurna. Dengan asumsi tersebut, persamaan adveksi–difusi tiga dimensi

(Stockie, 2011) tereduksi menjadi

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = K(x) \left(\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

dengan syarat awal dan syarat batas

$$C(0, y, z) = \frac{Q}{u} \delta(y) \delta(z - H) \quad (2)$$

serta $C \rightarrow 0$ untuk $x, |y|, z \rightarrow \infty$ dan $K \partial C / \partial z = 0$ pada $z = 0$, dengan δ adalah fungsi delta Dirac. Karena K sulit ditentukan secara langsung, peubah bebas diganti menjadi

$$r(x) = \frac{1}{u} \int_0^x K(\xi) d\xi \quad (3)$$

sehingga Persamaan (1) menjadi persamaan difusi dua dimensi

$$\frac{\partial c}{\partial r} = \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (4)$$

Solusi dicari dalam bentuk terpisah

$$c(r, y, z) = \frac{Q}{u} a(r, y) b(r, z) \quad (5)$$

dengan a dan b masing-masing memenuhi $\partial a / \partial r = \partial^2 a / \partial y^2$ dengan $a(0, y) = \delta(y)$, dan $\partial b / \partial r = \partial^2 b / \partial z^2$ dengan $b(0, z) = \delta(z - H)$ serta $\partial b / \partial z = 0$ di $z = 0$. Transformasi Laplace terhadap r (peubah Laplace ρ) mengubah masing-masing persamaan menjadi persamaan diferensial biasa; sebagai contoh, untuk a diperoleh $d^2 \hat{a} / dy^2 - \rho \hat{a} = -\delta(y)$, yang solusinya $\hat{a} = \exp(-\sqrt{\rho}|y|) / (2\sqrt{\rho})$. Transformasi balik memberikan

$$a(r, y) = \frac{1}{\sqrt{4\pi r}} \exp\left(-\frac{y^2}{4r}\right) \quad (6)$$

Untuk b , syarat tanpa-fluks di permukaan dipenuhi dengan menambahkan sumber bayangan (*image source*) di $z = -H$, sehingga

$$b(r, z) = \frac{1}{\sqrt{4\pi r}} \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{4r}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{4r}\right) \right] \quad (7)$$

Substitusi Persamaan (6) dan (7) ke Persamaan (5), kemudian mendefinisikan $\sigma^2 = 2r$, memberikan bentuk Gaussian. Pada praktiknya difusivitas arah lateral dan vertikal tidak sama, sehingga σ_y dan σ_z diambil sebagai fungsi empiris dari jarak x (Stockie, 2011). Hasilnya adalah persamaan Gaussian plume dengan pantulan permukaan:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (8)$$

Parameter model

Kecepatan angin di ketinggian cerobong dihitung dengan hukum pangkat (Beychok, 2005):

$$u(h) = u_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^p \quad (9)$$

dengan u_{10} adalah kecepatan angin pada 10 m dan $p = 0,12$ untuk kelas B dan C daerah perdesaan. Laju emisi dihitung dari kecepatan keluar gas, luas penampang, dan konsentrasi emisi terukur:

$$Q = V_s A C_s, \quad A = \frac{\pi d_s^2}{4} \quad (10)$$

Kenaikan kepulan (*plume rise*) dihitung dengan persamaan Briggs (Briggs, 1969; US EPA, 1995). Fluks daya apung F_b (m^4/s^3) dan jarak kenaikan akhir x_f (m) diberikan oleh

$$F_b = \frac{g V_s d_s^2 (T_s - T_a)}{4 T_s} \quad (11)$$



$$x_f = \begin{cases} 119 F_b^{2/5}, & F_b \geq 55 \\ 49 F_b^{5/8}, & F_b < 55 \end{cases} \quad (12)$$

dengan $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, T_s suhu gas, dan T_a suhu ambien. Kontribusi momentum diabaikan dalam perhitungan manual. Kenaikan kepulan dan tinggi efektif cerobong adalah

$$\Delta h = \frac{1,6 F_b^{1/3} x_f^{2/3}}{u(h)}, \quad H = h + \Delta h \quad (13)$$

Koefisien dispersi untuk daerah perdesaan memakai rumus Briggs (1973) sebagaimana dirangkum oleh Visscher (2014), dengan x dalam meter. Untuk kelas B, $\sigma_y = 0,16x(1 + 0,0001x)^{-1/2}$ dan $\sigma_z = 0,12x$. Untuk kelas C, $\sigma_y = 0,11x(1 + 0,0001x)^{-1/2}$ dan $\sigma_z = 0,08x(1 + 0,0002x)^{-1/2}$.

Perhitungan dan simulasi

Konsentrasi pada sumbu kepulan ($y = 0$) dan ketinggian reseptor $z = 1,5 \text{ m}$ dihitung dengan Persamaan (8) untuk jarak *downwind* hingga 10.000 m pada setiap cerobong, polutan, dan kelas stabilitas, kemudian dicari nilai maksimum dan jaraknya. Hasil yang sama dihitung dengan ScreenView, perangkat lunak yang mengimplementasikan model SCREEN3 US EPA (US EPA, 1995), dengan masukan laju emisi, tinggi dan diameter cerobong, kecepatan dan suhu gas, kecepatan angin 10 m, tipe daerah perdesaan, medan datar, serta opsi keberadaan badan air (perhitungan fumigasi pantai). Selisih relatif antara ScreenView (SV) dan perhitungan manual (man) dinyatakan sebagai

$$\Delta X = \frac{X_{SV} - X_{man}}{X_{man}} \times 100\% \quad (14)$$

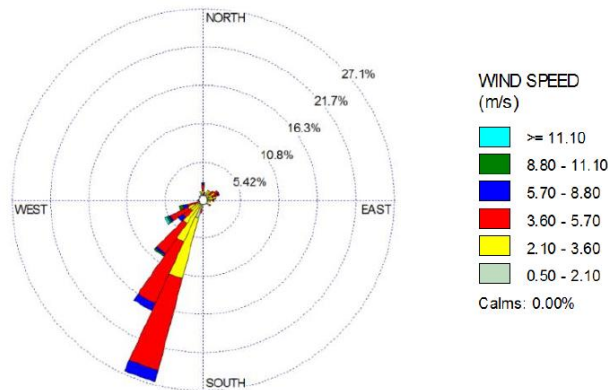
dengan X adalah konsentrasi maksimum atau jaraknya.

Sebaran spasial gabungan dihitung pada grid 25 m dengan menjumlahkan kontribusi ketiga cerobong. Posisi cerobong diubah dari koordinat geografis (Tabel 1) ke koordinat kartesian lokal, dan transport angin diarahkan ke azimuth 220° (menuju barat daya). Hasil dibandingkan dengan baku mutu udara ambien pada Lampiran VII Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 (Pemerintah Republik Indonesia, 2021) dan baku mutu emisi pada Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 13 Tahun 2009 (Kementerian Negara Lingkungan Hidup, 2009).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi meteorologi dan stabilitas atmosfer

Pada 2025, kecepatan angin harian maksimum di Balikpapan berkisar 2–17 m/s dengan rata-rata 3,7 m/s. Angin dominan tercatat bertiup dari timur laut menuju barat daya (Gambar 1). Pada Januari arah angin lebih bervariasi; pada Februari–Desember, arah dominan konsisten dengan rata-rata kecepatan bulanan 3,60–5,70 m/s. Dengan kecepatan 3,7 m/s dan radiasi matahari sedang, atmosfer tergolong kelas B–C (tidak stabil sedang hingga sedikit tidak stabil). Kecepatan dan arah dominan ini dipakai sebagai masukan seluruh perhitungan.



Gambar 1. Mawar angin berdasarkan kecepatan angin maksimum harian BMKG Balikpapan tahun 2025

Tinggi efektif cerobong

Seluruh cerobong memiliki $F_b > 55 \text{ m}^4/\text{s}^3$ sehingga kenaikan kepulan didominasi daya apung. Hasil perhitungan manual dan ScreenView ditunjukkan pada Tabel 2. Pada perhitungan manual, kecepatan angin di ketinggian cerobong lebih besar daripada keluaran ScreenView (4,59–4,83 m/s berbanding 4,2–4,6 m/s). Kecepatan angin yang lebih kecil membuat kepulan naik lebih tinggi, sehingga tinggi efektif ScreenView lebih besar 6–8% (kelas B) dan 2–3% (kelas C) dibandingkan hasil manual.

Tabel 2. Fluks daya apung, kecepatan angin pada ketinggian cerobong, dan tinggi efektif

Cerobong	h (m)	F_b (m^4/s^3)	$u(h)$ manual (m/s)	H manual (m)	$u(h)$ ScreenView, B / C (m/s)	H ScreenView, B / C (m)
1	60	68,42	4,59	166,38	4,2 / 4,2	176,32 / 170,24
2	91	151,93	4,83	254,32	4,3 / 4,6	273,34 / 261,66
3	91	180,43	4,83	272,06	4,3 / 4,6	293,16 / 280,28

Konsentrasi maksimum di permukaan

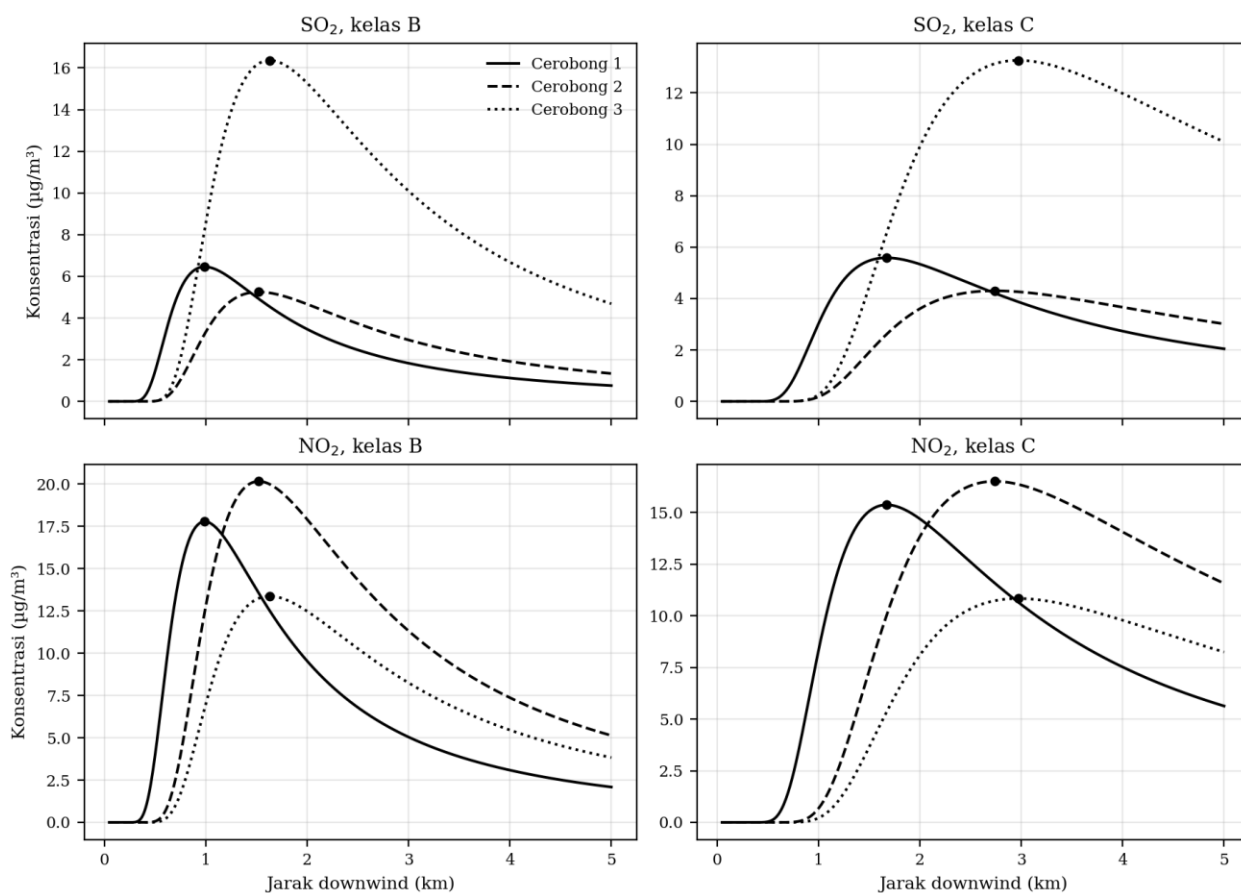
Tabel 3 merangkum konsentrasi maksimum di permukaan dan jaraknya. Pada kelas B, maksimum terjadi pada jarak 990–1.630 m dari cerobong; pada kelas C, jaraknya bergeser 1,7–1,8 kali lebih jauh, yaitu 1.670–2.970 m, dengan konsentrasi 13–19% lebih rendah (Gambar 2). Atmosfer kelas C lebih stabil sehingga pencampuran vertikal lebih lambat dan kepulan baru mencapai permukaan di jarak yang lebih jauh dengan pengenceran yang lebih besar.

Tabel 3. Konsentrasi maksimum di permukaan ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dan jaraknya (m): perhitungan manual dan ScreenView

Kelas	Cerob.	Polutan	C_{maks} manual	x manual	C_{maks} SV	x SV	ΔC (%)	Δx (%)
B	1	Partikulat	0,422	990	0,385	1.135	-8,8	+14,6
B	1	SO ₂	6,46	990	5,89	1.135	-8,8	+14,6
B	1	NO ₂	17,83	990	16,26	1.135	-8,8	+14,6
B	2	Partikulat	0,390	1.520	0,374	1.696	-4,2	+11,6
B	2	SO ₂	5,25	1.520	5,03	1.696	-4,2	+11,6
B	2	NO ₂	20,15	1.520	19,03	1.696	-5,6	+11,6



Kelas	Cerob.	Polutan	C_{maks} manual	x manual	C_{maks} SV	x SV	ΔC (%)	Δx (%)
B	3	Partikulat	0,407	1.630	0,391	1.804	-3,9	+10,7
B	3	SO ₂	16,38	1.630	15,74	1.804	-3,9	+10,7
B	3	NO ₂	13,37	1.630	12,84	1.804	-3,9	+10,7
C	1	Partikulat	0,365	1.670	0,324	1.997	-11,3	+19,6
C	1	SO ₂	5,59	1.670	4,96	1.997	-11,3	+19,6
C	1	NO ₂	15,42	1.670	13,68	1.997	-11,3	+19,6
C	2	Partikulat	0,320	2.740	0,293	3.196	-8,2	+16,6
C	2	SO ₂	4,30	2.740	4,03	3.196	-6,4	+16,6
C	2	NO ₂	16,51	2.740	15,15	3.196	-8,2	+16,6
C	3	Partikulat	0,330	2.970	0,305	3.431	-7,6	+15,5
C	3	SO ₂	13,28	2.970	12,27	3.431	-7,6	+15,5
C	3	NO ₂	10,84	2.970	10,01	3.431	-7,6	+15,5



Gambar 2. Konsentrasi permukaan sepanjang sumbu kepulan terhadap jarak *downwind* (perhitungan manual). Titik hitam menandai maksimum

Jarak maksimum dapat dijelaskan secara analitik. Untuk kelas B, $\sigma_z = 0,12x$ bersifat linear sehingga konsentrasi pada sumbu kepulan maksimum ketika

$$\sigma_z(x_{\max}) = \frac{H}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

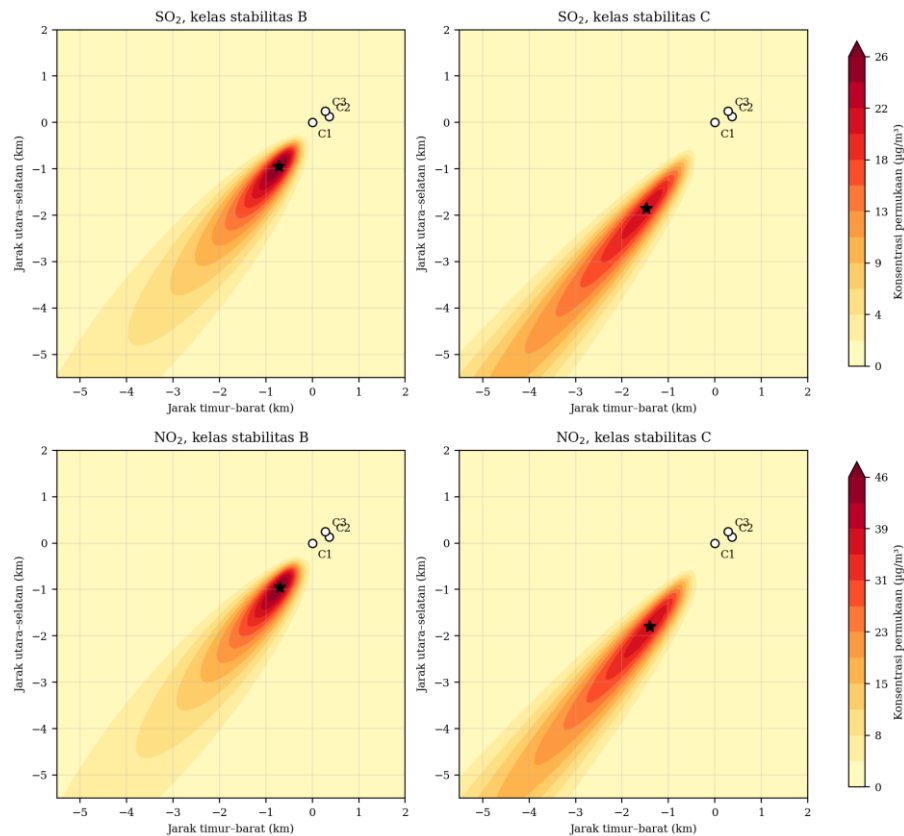
Untuk Cerobong 1, $H = 166,38$ m menghasilkan $x_{\max} \approx H/(0,12\sqrt{2}) \approx 980$ m, sesuai dengan hasil numerik 990 m. Nilai konsentrasi maksimum berbanding lurus dengan Q dan berbanding terbalik dengan uH^2 , sehingga polutan dengan laju emisi terbesar mendominasi: SO_2 terbesar berasal dari Cerobong 3 ($Q = 30,9$ g/s; $16,38$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$, kelas B), sedangkan NO_2 terbesar berasal dari Cerobong 2 ($Q = 33,4$ g/s; $20,15$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$, kelas B). Konsentrasi partikulat sangat kecil ($\leq 0,42$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$) karena kadar emisinya hanya $4,99$ mg/Nm³ pada ketiga cerobong.

Perbandingan perhitungan manual dan ScreenView

Kedua pendekatan memakai persamaan Gaussian yang sama dan memberikan pola yang konsisten. ScreenView menghasilkan konsentrasi maksimum 3,9–11,3% lebih rendah (rata-rata -7,3%) dan jarak maksimum 10,7–19,6% lebih jauh (rata-rata +14,8%) dibandingkan perhitungan manual. Selisih lebih besar terjadi pada kelas C dan pada Cerobong 1, yang tinggi efektifnya paling kecil. Tiga faktor menjelaskan selisih tersebut. Pertama, ScreenView menghasilkan kecepatan angin di ketinggian cerobong yang lebih rendah dan tinggi efektif yang lebih besar (Tabel 2), yang menggeser maksimum ke jarak lebih jauh. Kedua, koefisien dispersi ScreenView lebih besar. Pada jarak 100 m kelas B, σ_y dan σ_z ScreenView adalah 21,52 m dan 14,30 m, sedangkan rumus Briggs menghasilkan 15,99 m dan 12,00 m; dispersi yang lebih besar menurunkan konsentrasi dan memperluas sebaran. Ketiga, ScreenView memperhitungkan fluks momentum dalam kenaikan kepulan dan, karena cerobong berada kurang dari 3.000 m dari badan air, perhitungan fumigasi pantai. Perbedaan konsentrasi di bawah 12% tergolong kecil karena ketidakpastian model Gaussian umumnya dinyatakan dalam faktor dua (Hanna *et al.*, 1982), sehingga perhitungan manual dapat dipakai untuk penapisan awal dan ScreenView sebagai pembanding independen.

Sebaran spasial gabungan tiga cerobong

Gambar 3 menunjukkan konsentrasi permukaan gabungan SO_2 dan NO_2 untuk transport menuju barat daya. Pada kelas B, kepulan lebih lebar dan maksimum berada sekitar 1,2 km dari Cerobong 1; pada kelas C, kepulan lebih sempit dan memanjang dengan maksimum sekitar 2,3 km dari Cerobong 1. Karena Cerobong 3 terletak hanya 144 m dari Cerobong 2 dan sejajar dengan arah angin, kepulan keduanya menyatu, sedangkan kepulan Cerobong 1 bergabung di sisi hilir. Penjumlahan ini menghasilkan maksimum gabungan 26,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (kelas B) dan 21,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (kelas C) untuk SO_2 , serta 46,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 38,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk NO_2 . Maksimum gabungan partikulat adalah 1,11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (kelas B) dan 0,91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (kelas C).



Gambar 3. Konsentrasi permukaan gabungan dari tiga cerobong pada ketinggian reseptor 1,5 m: SO₂ (baris atas) dan NO₂ (baris bawah) untuk kelas stabilitas B (kiri) dan C (kanan). Angin menuju azimut 220°; bintang menandai maksimum

Evaluasi terhadap baku mutu

Konsentrasi emisi terukur pada ketiga cerobong (partikulat 4,99 mg/Nm³; SO₂ hingga 200,61 mg/Nm³; NO₂ hingga 257,59 mg/Nm³) berada di bawah baku mutu emisi yang dirujuk dalam penelitian ini, yaitu 150, 800, dan 1.000 mg/Nm³ (Kementerian Negara Lingkungan Hidup, 2009). Pada sisi udara ambien, maksimum gabungan yang dihitung jauh di bawah baku mutu Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 (Tabel 4).

Tabel 4. Konsentrasi maksimum gabungan hasil model dan baku mutu udara ambien (µg/m³)

Parameter	Maks. kelas B	Maks. kelas C	Baku mutu	Waktu rata-rata	% baku mutu (kelas B)
SO ₂	26,5	21,5	150	1 jam	17,6
NO ₂	46,2	38,2	200	1 jam	23,1
Partikulat (TSP)	1,11	0,91	230	24 jam	0,5

Hasil tersebut mencerminkan kontribusi ketiga cerobong saja pada kondisi angin dan emisi yang dimodelkan, tanpa konsentrasi latar. Perbandingan partikulat memakai baku mutu TSP 24 jam; karena maksimum model bersifat jangka pendek, perbandingan ini konservatif. Arah transport dominan menuju barat daya, yang berdasarkan pengamatan peta merupakan area kompleks kilang, sehingga paparan pada permukiman umum pada skenario ini diperkirakan kecil. Meski demikian, pemantauan udara ambien pada jarak 1–3 km searah

angin dominan tetap diperlukan untuk memverifikasi prediksi model.

Keterbatasan

Penelitian ini memakai kondisi tunak dengan satu kecepatan dan arah angin dominan sepanjang tahun, sehingga variasi harian dan musiman tidak tertangkap. Kecepatan angin yang dipakai adalah kecepatan maksimum harian, yang dapat berbeda dari kecepatan rata-rata pada jam tertentu. Medan dianggap datar, konversi kimia (misalnya NO menjadi NO₂) tidak dimodelkan, dan data emisi berasal dari pengujian periodik, bukan pemantauan kontinu. Model Gaussian juga kurang andal pada angin sangat lemah (< 1 m/s). Prediksi belum divalidasi dengan pengukuran udara ambien.

KESIMPULAN

Model Gaussian plume berhasil diturunkan dari persamaan adveksi–difusi tunak dengan transformasi Laplace dan diterapkan pada tiga cerobong kilang Pertamina RU V. Dengan data emisi dan meteorologi aktual, konsentrasi maksimum di permukaan terjadi pada jarak 990–1.630 m (kelas B) dan 1.670–2.970 m (kelas C). Nilai tertinggi untuk satu cerobong adalah 0,42 µg/m³ untuk partikulat, 16,38 µg/m³ untuk SO₂, dan 20,15 µg/m³ untuk NO₂. ScreenView memberikan konsentrasi maksimum 3,9–11,3% lebih rendah dengan jarak 10,7–19,6% lebih jauh, akibat perbedaan kecepatan angin pada ketinggian cerobong, kenaikan kepulan, dan koefisien dispersi. Sebaran gabungan ketiga cerobong menghasilkan maksimum 26,5 µg/m³ untuk SO₂ dan 46,2 µg/m³ untuk NO₂, atau 17,6% dan 23,1% dari baku mutu satu jam pada Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021.

Penelitian lanjutan disarankan memodelkan variasi arah dan kecepatan angin per jam, perbedaan musim, serta kelas stabilitas malam hari. Validasi dengan pengukuran udara ambien di sepanjang arah angin dominan, penambahan konsentrasi latar, dan perbandingan dengan model regulasi seperti AERMOD akan meningkatkan keandalan hasil.

PENGAKUAN/ACKNOWLEDGEMENTS

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Pertamina (Persero) Refinery Unit V Balikpapan atas data emisi cerobong, kepada BMKG Balikpapan atas data meteorologi, serta kepada Program Studi Matematika, Institut Teknologi Kalimantan, atas dukungan selama pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, J., & Purqon, A. (2016). Permodelan polusi udara dengan Gaussian plume. *Prosiding SNIPS 2016*, 444–452. Institut Teknologi Bandung.
- Assegaf, A. H. (2018). Pemodelan dispersi gas dari cerobong PLTU dengan model Pasquill-Gaussian. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 8(3), 414–419.
- Beychok, M. R. (2005). *Fundamentals of stack gas dispersion* (4th ed.). Milton R. Beychok.
- Briggs, G. A. (1969). *Plume rise* (AEC Critical Review Series TID-25075). U.S. Atomic Energy Commission.
- Briggs, G. A. (1973). *Diffusion estimation for small emissions* (ATDL Contribution File No. 79). Air Resources Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory, NOAA.
- Cimorelli, A. J., Perry, S. G., Venkatram, A., Weil, J. C., Paine, R. J., Wilson, R. B., Lee, R. F., Peters,

- W. D., & Brode, R. W. (2005). AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part I: General model formulation and boundary layer characterization. *Journal of Applied Meteorology*, 44(5), 682–693.
- Dewi, N. W. S. P., & June, T. (2018). Estimasi pola dispersi debu, SO₂ dan NO_x dari industri semen menggunakan model Gauss yang diintegrasikan dengan SCREEN3. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*.
- Edokpa, D. A., & Nwagbara, M. O. (2017). Atmospheric stability pattern over Port Harcourt, Nigeria. *Journal of Atmospheric Pollution*, 5(1), 9–17.
- Faisal, M., et al. (2021). Balikpapan's wind analysis to determine air quality monitoring point to support smart environment monitoring system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2106, 012916.
- Febriyanti, A. L. (2020). *Model matematika penyebaran polusi udara untuk menentukan jarak aman pemukiman dari cerobong asap industri* [Skripsi, Institut Teknologi Kalimantan].
- Gifford, F. A. (1961). Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion. *Nuclear Safety*, 2(4), 47–51.
- Hanna, S. R., Briggs, G. A., & Hosker, R. P. (1982). *Handbook on atmospheric diffusion* (DOE/TIC-11223). U.S. Department of Energy, Technical Information Center.
- Hasibuan, F., Warsito, & Suciati, S. W. (2015). Simulasi model dispersi polutan gas dan partikulat molekul pada pabrik semen dengan menggunakan software Matlab 7.12. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 3(2).
- Holmes, N. S., & Morawska, L. (2006). A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. *Atmospheric Environment*, 40(30), 5902–5928.
- Kementerian Negara Lingkungan Hidup. (2009). *Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 13 Tahun 2009 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak bagi Usaha dan/atau Kegiatan Minyak dan Gas Bumi*.
- Khaniabadi, Y. O., Sicard, P., Taiwo, A. M., De Marco, A., Esmaeili, S., & Rashidi, R. (2018). Modeling of particulate matter dispersion from a cement plant: Upwind-downwind case study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, 3104–3110.
- Leelőssy, Á., Molnár, F., Izsák, F., Havasi, Á., Lagzi, I., & Mészáros, R. (2014). Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: A review. *Central European Journal of Geosciences*, 6(3), 257–278.
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health*, 8, Article 14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Pasquill, F. (1961). The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteorological Magazine*, 90(1063), 33–49.
- Pemerintah Kota Balikpapan. (2021). *Peraturan Daerah Kota Balikpapan Nomor 6 Tahun 2021 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah (RPJMD) Kota Balikpapan Tahun 2021–2026*.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup* (Lampiran VII: Baku Mutu Udara Ambien).

- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Stockie, J. M. (2011). The mathematics of atmospheric dispersion modeling. *SIAM Review*, 53(2), 349–372. <https://doi.org/10.1137/10080991X>
- Turner, D. B. (1994). *Workbook of atmospheric dispersion estimates: An introduction to dispersion modeling* (2nd ed.). CRC Press.
- Ulfah, S., et al. (2018). Advection-diffusion model for the simulation of air pollution distribution from a point source emission. *Journal of Physics: Conference Series*, 948, 012067.
- US EPA. (1995). *SCREEN3 model user's guide* (EPA-454/B-95-004). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards.
- Visscher, A. D. (2014). *Air dispersion modeling: Foundations and applications*. John Wiley & Sons.
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.