

Aplikasi Model Box Dalam Penyebaran Polutan Udara (NO₂ dan SO₂) di Area Benete, Departemen Powerplant PT. Amman Mineral Nusa Tenggara

Roro Nawang Wulan^{1*}, Retno Wulandari²

¹Universitas Ivet Semarang, Indonesia


²PT. Amman Mineral Nusa Tenggara, Indonesia

Email: ¹roro_nawangwulan@yahoo.com, ²retno_wulandari@gmail.com

Email Penulis Korespondensi: ¹roro_nawangwulan@yahoo.com

Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: Model Box NO ₂ dan SO ₂ PT. Amman Mineral Nusa Tenggara (AMNT) Validasi model	NO ₂ dan SO ₂ merupakan polutan yang paling banyak dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga diesel dan pembangkit listrik tenaga uap. Dalam penerapan model box, faktor meteorologi seperti kecepatan dan arah mata angin, serta durasi matahari, sangat berpengaruh terhadap polutan yang diemisikan oleh sumber. Tahap penelitian dimulai dari pengukuran konsentrasi polutan udara di Benete Port I (200 selama 24 jam dengan menggunakan seperangkat peralatan yang disebut mobile trailer analyzer. Konsentrasi ambien yang didapat dari hasil pengukuran kemudian divalidasi dengan konsentrasi yang didapat dari perhitungan dengan menggunakan model box. Validasi model terbesar dan terkecil pada area Benete Port I adalah (NO ₂ = 52.4 % dan SO ₂ = 51.9 %) sedangkan validasi model terkecil adalah (NO ₂ = 4.3 % dan SO ₂ = 0 %) sehingga didapatkan Rata – rata validasi model box untuk SO ₂ sebesar 20.8 % dan NO ₂ sebesar 33.9 %. Konsentrasi terbesar di Benete Port I adalah (SO ₂ = 5.0 ppb dan NO ₂ = 7.1 ppb) sedangkan konsentrasi terkecil adalah (SO ₂ = 4.1 ppb dan NO ₂ = 6.3 ppb).
Keywords: Box Model NO ₂ and SO ₂ PT. Amman Mineral Nusa Tenggara Model Validation	Abstract NO ₂ and SO ₂ are the pollutants which are mostly produced by diesel energy power station and steam energy power station. In the application of Box model, meteorological factors such as wind speed and direction, as well as the sun duration, are very influential to the pollutants emitted by the source. The research step begin with the measurement of the air pollutant in. Benete Port I (200 m) for 24 hours by using a set of tools called mobile trailer analyzer. The concentration of the ambient resulted from the measurement, then is validated with the concentration by using box model. The largest and smallest model validations in the Benete Port I area are (NO ₂ = 52.4% and SO ₂ = 51.9%), while the smallest model validation is (NO ₂ = 4.3% and SO ₂ = 0%), so that the average box model validation for SO ₂ is 20.8% and NO ₂ is 33.9%. The biggest concentration in Benete Port I is (SO ₂ = 5.0 ppb and NO ₂ = 7.1 ppb) while the smallest is (SO ₂ = 4.1 ppb and NO ₂ = 6.3 ppb).

JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License



1. PENDAHULUAN

Menurut PP No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (Pasal 1 angka 49), pencemaran udara adalah masuk atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lainnya ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu udara ambien yang telah ditetapkan. Salah satu sektor yang melepaskan polutan ke udara adalah aktivitas dari sektor industri terutama industri pertambangan yang memiliki pembangkit listrik baik diesel maupun uap.

Pencemaran udara berasal dari zat pencemar yang diemisikan dari sumbernya baik sumber alami atau sumber antropogenik [1]. Contoh sumber alami adalah akibat letusan gunung berapi, kebakaran hutan, dekomposisi biotik, debu, spora tumbuhan dan lain sebagainya. Pencemaran akibat kegiatan manusia secara kuantitatif sering lebih besar, misalnya sumber pencemar akibat aktivitas transportasi, industri, persampahan baik akibat proses dekomposisi ataupun pembakaran dan rumah tangga, [2]. Faktor meteorologis seperti ketinggian vertical dari lapisan pencampuran (*mixing height*), kecepatan dan arah angin akan membantu penyebaran zat pencemar ke arah horizontal dan vertikal di atmosfer sekitarnya.

Berdasarkan data dari WHO [3] dalam portal Kemenkes, 2024 menunjukkan bahwa polusi udara sebagai penyebab 7 juta kematian di seluruh dunia setiap tahun. Tak hanya membahayakan kesehatan manusia, polusi udara juga memicu pembentukan kabut asap dan hujan asam, merusak tanaman dan hutan, serta mencemari lingkungan. Penyebab polusi udara ini berasal dari sumber – sumber emisi seperti emisi dari kendaraan yang mengandung karbon monoksida (CO); limbah asap industri yang menghasilkan gas berbahaya seperti CO, NO₂ dan SO₂; Pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar fosil minyak bumi dan batu bara dalam skala besar menghasilkan gas berbahaya yaitu CO, partikulat, NO₂ dan SO₂ yang menyumbang hampir 80% polusi udara; aktivitas pertanian dalam penggunaan pupuk berlebihan sehingga dapat menghasilkan polutan berupa gas ammonia (NH₃); kebakaran hutan yang dapat menghasilkan polutan berupa nitrogen dioksida (NO₂), ozon, hidrokarbon aromatik, dan timbal; aktivitas domestik seperti merokok dan pembakaran sampah serta penggunaan AC.

Zat pencemar yang diemisikan dari sumbernya terutama dari pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) dan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah NO₂ dan SO₂. Menurut [4] Gas nitrogen dioksida (NO₂) merupakan polutan udara ambien bersama unsur nitrogen monoksida (NO) yang biasanya dihasilkan dari kegiatan manusia seperti pembakaran bahan bakar mesin kendaraan, pembakaran sampah, pembakaran batubara dan industri. Karakteristik gas ini memiliki bau tajam dan berwarna cokelat dimana dampaknya terhadap kesehatan terutama adalah penurunan fungsi paru, menyebabkan sesak napas, bahkan berujung pada kematian. Berdasarkan informasi *Safety Data Sheet*, pajanan gas NO₂ dapat menyebabkan iritasi lendir, sinus, faring, respirasi tidak teratur, bahkan edema paru [5].

Sulfur dioksida (SO₂) adalah komponen pencemar udara dengan jumlah paling banyak. Gas ini memiliki karakteristik tidak berwarna dan berbau tajam, apabila bereaksi dengan uap air di udara akan menjadi H₂SO₄ atau dikenal sebagai hujan asam yang dapat menimbulkan kerusakan baik material, benda, maupun tanaman [6], [7]. Berdasarkan informasi *Safety Data Sheet*, pajanan gas SO₂ dapat menyebabkan iritasi mata, hidung, tenggorokan, sinus, edema paru, bahkan berujung pada kematian [8]. Kedua gas pencemar tersebut, baik NO₂ maupun SO₂ memberikan dampak negatif terutama pada saluran pernapasan sebab masuk melalui proses inhalasi.

Menurut [9], Salah satu upaya untuk mengatasi pencemaran udara adalah dengan mengendalikan zat pencemar dari sumbernya. Caranya dengan penggunaan bahan bak, proses dan teknologi yang lebih efisien. Penggunaan alat pengendali emisi juga menjadi upaya yang efektif dalam mengurangi emisi dari sumber. Kaitannya dengan alat pengendali emisi tentunya diperlukan adanya pemantauan terhadap emisi yang dihasilkan untuk mengetahui apakah buangan emisi dari PLTD maupun PLTU melebihi baku mutu atau tidak. Pemantauan tersebut meliputi pemantauan pada sumber emisi dan juga pemantauan emisi yang telah tercampur oleh udara sekitar (ambient).

PT Amman Mineral Nusa Tenggara merupakan salah satu perusahaan pertambangan terkemuka di Indonesia yang berkontribusi signifikan pada perekonomian nasional melalui ekspor konsentrat tembaga dan pengembangan infrastruktur di Sumbawa. Perusahaan ini merupakan anak perusahaan PT Amman Mineral Internasional Tbk (AMMN) yang mengoperasikan tambang tembaga dan emas kelas dunia, Batu Hijau, di Pulau

Sumbawa, NTB. Sebagai salah satu produsen tembaga terbesar di Indonesia, AMNT memproses bijih menjadi konsentrat. Sebelumnya perusahaan ini bernama PT Newmont Nusa Tenggara (NNT), namun di tanggal 2 November 2016 resmi berganti nama menjadi PT Amman Mineral Nusa Tenggara (AMNT). (amman.co.id). Untuk memenuhi kebutuhan daya listrik, PT. AMNT memiliki pembangkit listrik sendiri yang terdiri dari PLTU dan PLTD dengan kapasitas masing – masing 25 MW dan 5 MW. Pembangkit listrik pada umumnya menghasilkan buangan emisi yang berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia apabila melebihi baku mutu. Salah satu dampak negatifnya adalah adanya gas emisi polutan antara lain CO, Hidrokarbon, VOCs, NO_x, H₂S, SO_x dan emisi partikulat.

Pada awal berdirinya PT. AMNT berkomitmen dalam upaya pelestarian lingkungan. Salah satunya adalah pemantauan gas buang pada masing-masing pembangkit listrik yang telah dilakukan oleh Departemen Power Plant, meliputi pemantauan pada sumber emisi juga pemantauan emisi yang sudah tercampur (*ambient*). Selain itu, masing-masing pembangkit listrik sudah dilengkapi pereduksi emisi. Misalnya di PLTD memiliki unit SCR (*System Catalyst Reduction*) yaitu suatu sistem yang berfungsi mereduksi NO_x dan SO_x. Dengan melihat kondisi tersebut, perlu adanya pengembangan suatu model yang tepat untuk memprediksi pola sebaran emisi gas buang yang dihasilkan oleh PLTD. Dalam penelitian ini akan digunakan model box. Model ini digunakan untuk memperkirakan konsentrasi zat pencemar dalam ruang dan waktu sebagai fungsi dari distribusi emisi dan parameter meteorologis serta keadaan geofisika. Output dari model ini akan divalidasi dengan data pemantauan kualitas udara di lapangan.

Tujuan penelitian aplikasi model box dalam penyebaran polutan udara (NO₂ dan SO₂) di area Departemen Power Plant, PT. AMNT adalah :

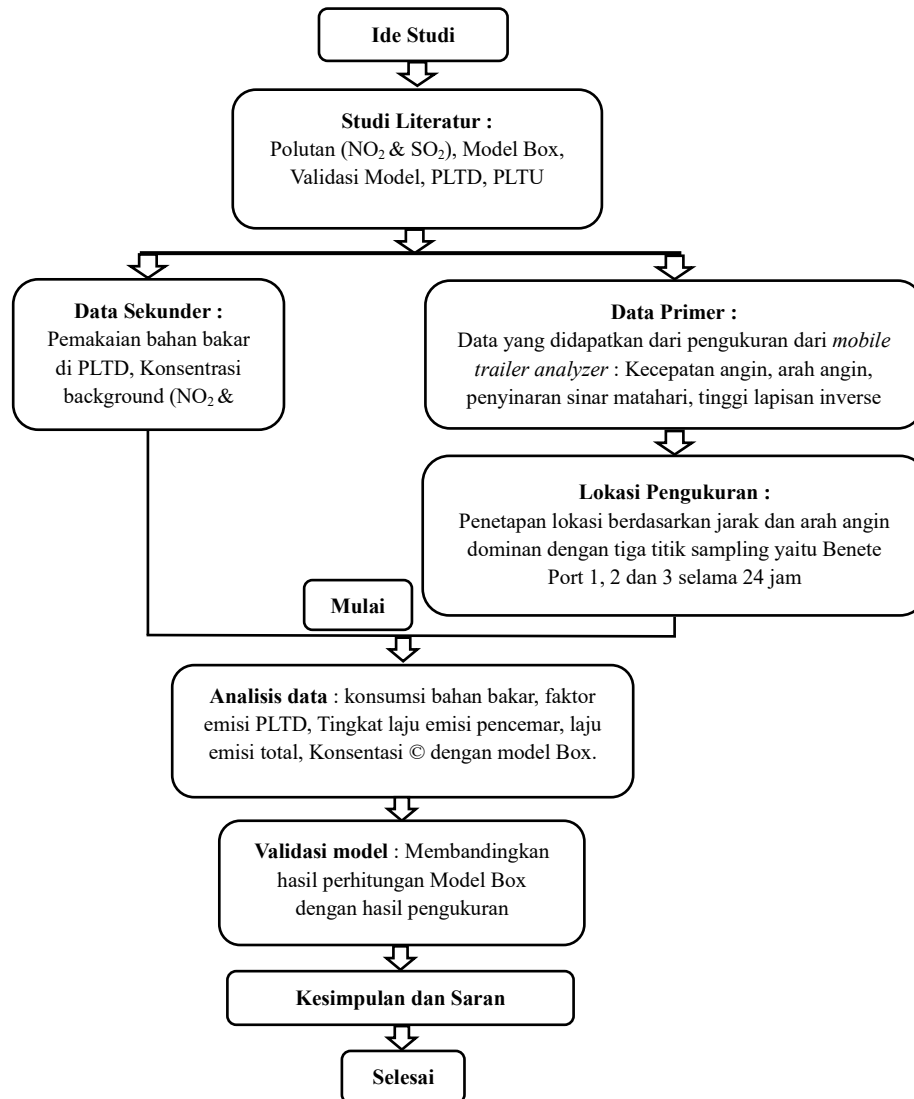
1. Menganalisis penyebaran polutan udara dengan menggunakan Model Box untuk memprediksi (NO₂ dan SO₂) dari gas buang dari PLTD di area Departemen Power Plant, PT. AMNT.
2. Mengetahui konsentrasi polutan (NO₂ dan SO₂) dari gas buang PLTD di area Departemen Power Plant, PT. AMNT.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini bersifat eksperimental dimana pengambilan sampling dilakukan dengan cara pengukuran secara langsung di lapangan. Konsentrasi yang diukur adalah emisi gas buang dari PLTD dan PLTU yaitu NO₂ dan SO₂. Peralatan yang digunakan dalam pengukuran ini adalah *Mobile Trailer Analyzer*.

Menurut [10] Data merupakan fondasi utama dalam penelitian karena kualitas dan ketepatannya memengaruhi validitas dan akurasi temuan. Pengumpulan dan analisis data yang cermat sangat penting untuk menghasilkan penelitian yang bermakna. data primer menawarkan informasi yang paling relevan dan akurat, data sekunder memudahkan akses dan efisiensi biaya, sementara data tersier memberikan konteks tambahan. Sedangkan data sekunder memberikan referensi dan penguatan dari data primer. Sehingga penelitian ini akan melakukan pengambilan dua data yaitu data primer dan data sekunder.

Secara lengkap. metodologi penelitian ini tersaji dalam diagram alir penelitian dibawah ini :



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian
Hasil analisa, 2026

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Perhitungan Tingkat Laju Emisi Pencemar Pada PLTD

Penentuan tingkat laju emisi pencemar (Q) sangat bergantung pada faktor emisi pembangkit listrik tenaga diesel.

Langkah – langkah perhitungan sebagai berikut :

1. Perhitungan Konsentrasi Bahan Bakar

Untuk menghitung konsumsi bahan bakar per hari maka diperlukan data konsumsi bahan bakar dan daya yang terpakai oleh PLTD selama satu bulan, yaitu di bulan Februari.

Contoh Perhitungan :

Konsumsi bahan bakar (1 bulan) = 1206000 liter.

Pemakaian daya (1 bulan) = 5290.65 MW

Rata – rata daya yang dihasilkan selama satu hari = $5290.65 \text{ MW} / 28 \text{ hr} = 188.95 \text{ MW}$

Bahan bakar yang dibutuhkan untuk memproduksi listrik 1 hari :

= 1206000 liter / 28 hari

= 43071.43 liter/hari

Konsumsi bahan bakar / hari = $43071.43 \text{ liter/hari} / 188.95 \text{ MW} = 654.95 \text{ liter/MW}$.

2. Perhitungan Faktor Emisi PLTD

Data yang diperlukan untuk menghitung faktor emisi PLTD adalah dengan mengetahui data faktor emisi bahan bakar solar dan konsumsi bahan bakar selama satu hari. Faktor emisi NO₂ dan SO₂ dengan menggunakan persamaan 2.2 mengacu pada USEPA AP-42 (1995) *Fifth Edition, Chapter 3.4: Large Stationary Diesel and All Stationary Dual-fuel Engines*.

Contoh perhitungan :

Faktor emisi SO₂ = 104 pounds / 1000 gallon

= 10.254 mg/m³

Faktor emisi NO₂ = 157 pounds / 1000 gallon

= 15.480 mg/m³

Konsumsi BB/hari = 0.655 m³ / MW

Untuk FE SO₂ = $10.254 \text{ mg/m}^3 \times 0.655 \text{ m}^3 / \text{MW} = 6.716 \text{ mg/MW}$

Untuk FE NO₂ = $15.480 \text{ mg/m}^3 \times 0.655 \text{ m}^3 / \text{MW} = 10.139 \text{ mg/MW}$

3. Perhitungan Tingkat Laju Emisi Pencemar

Menghitung tingkat laju emisi (Q) pada PLTD dengan menggunakan persamaan 2.3 mengacu pada USEPA AP-42 (1995) *Fifth Edition, Chapter 3.4: Large Stationary Diesel and All Stationary Dual-fuel Engines*. Daya yang digunakan sebagai contoh perhitungan adalah tanggal 16 Februari pukul 07.00 – 08.00 WITA.

Contoh perhitungan :

Untuk SO₂

Efisiensi SCR = 60%

Daya = 124 MW

FE SO₂ = 6.716 mg/MW

Dengan menggunakan data diatas maka laju emisi SO₂ sebagai berikut :

Laju Emisi (Q) SO₂ = $124 \text{ MW} \times 6.716 \text{ mg/MW} \times (1-60/100)$

= 333.114 mg/m³

Untuk NO₂

Efisiensi SCR = 60%

Daya = 124 MW

FE NO₂ = 10.139 mg/MW

Dengan menggunakan data diatas maka laju emisi NO₂ sebagai berikut :

Laju Emisi (Q) NO₂ = $124 \text{ MW} \times 10.139 \text{ mg/MW} \times (1-60/100)$

$$= 502.89 \text{ mg/m}^3$$

Laju emisi (NO₂ dan SO₂) di PLTU merupakan hasil pembacaan harian dari alat CEMS (*Continuous Emission*). Pada pukul 07.00 – 08.00 WITA laju emisi SO₂ = 637.98 mg/m³ sedangkan laju emisi NO₂ = 937.4 mg/m³

4. Perhitungan Laju Emisi Total

Laju emisi total gas merupakan penjumlahan laju emisi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) pada tanggal 16 Februari di Benete Port I.

$$\begin{aligned} Q_{\text{total SO}_2} &= Q_{\text{PLTD}} + Q_{\text{PLTU}} \\ &= 333.11 \text{ mg/m}^3 + 637.98 \text{ mg/m}^3 \\ &= 971.09 \text{ mg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{total NO}_2} &= Q_{\text{PLTD}} + Q_{\text{PLTU}} \\ &= 502.89 \text{ mg/m}^3 + 937.4 \text{ mg/m}^3 \\ &= 1440.33 \text{ mg/m}^3 \end{aligned}$$

Tabel 1. Laju Emisi Total Gas NO₂ dan SO₂ di Benete Port I

Waktu	Laju Emisi Total SO ₂ (mg/m ³)	Laju Emisi Total NO ₂ (mg/m ³)
00.00 – 01.00	629.5	925.7
01.00 – 02.00	626.6	927.6
02.00 – 03.00	628.0	917.4
03.00 – 04.00	994.5	1465.4
04.00 – 05.00	1087.6	1604.5
05.00 – 06.00	1065.7	1576.9
06.00 – 07.00	1004.6	1476.9
07.00 – 08.00	971.1	1440.3
08.00 – 09.00	994.0	1457.2
09.00 – 10.00	1103.6	1644.1
10.00 – 11.00	1081.1	1597.4
11.00 – 12.00	1134.9	1651.8
12.00 – 13.00	1060.5	1535.3
13.00 – 14.00	1142.3	1668.5
14.00 – 15.00	1000.5	1474.7
15.00 – 16.00	1210.9	1742.5
16.00 – 17.00	1164.2	1807.3
17.00 – 18.00	619.5	965.1
18.00 – 19.00	627.2	963.5
19.00 – 20.00	651.9	900.8
20.00 – 21.00	657.4	885.1
21.00 – 22.00	663.4	911.2
22.00 – 23.00	667.2	936.2
23.00 – 00.00	665.6	905.8

Sumber : hasil perhitungan, 2026

5.1. Perhitungan Konsentrasi (C) Dengan Model Box

Langkah – langkah perhitungan :

1. Penentuan dimensi kotak (box)

Ditentukan box mempunyai dimensi 500 m x 500 m penentuan ini disesuaikan dengan jarak sumber pencemar (PLTD) dengan bangunan disekitar *Power Plant* sebagai batas kotak dengan jarak rata – rata bangunan terhadap sumber pencemar adalah 30 m.

2. Penentuan *mixing height* dan konsentrasi *background*

mixing height atau tinggi lapisan *inverse* yaitu sebesar 1260 m. Data ini didapatkan dari rata – rata lapisan inversi dari area studi yang didapatkan dari Departemen Lingkungan, PT. AMNT.

Konsentrasi *background* didapatkan dari pengukuran sebelumnya oleh Departemen Lingkungan dimana konsentrasi ini diambil dari nilai konsentrasi terkecil dari hasil pengukuran.

3. Penentuan kecepatan angin

Kecepatan angin sebesar 1.53 m/det. Data ini didapatkan dari pengukuran kecepatan angin rata – rata pada bulan Februari.

4. Perhitungan laju emisi per satuan luas (Q')

Penentuan laju emisi per satuan luas dengan menggunakan persamaan :

$$Q' = \frac{Q}{A}$$

Dimana :

Q' = Laju emisi per satuan luas (Kg/m².dt)

Q = Laju emisi (Kg/jam)

A = Luas box (m²)

Contoh Perhitungan :

Parameter pencemar untuk SO₂ dan NO₂ pada Benete Port I pada pukul 07.00 – 08.00

$$Q \text{ SO}_2 = 971.1 \text{ mg/m}^3$$

$$Q \text{ NO}_2 = 1440.3 \text{ mg/m}^3$$

$$L \text{ Box} = 500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$$

$$S = 30 \text{ m}$$

$$\text{Parameter SO}_2 = Q' = \frac{971.1 \times 30}{500 \times 500} = 0.12 \text{ mg/m}^3$$

$$\text{Parameter NO}_2 = Q' = \frac{1440.3 \times 30}{500 \times 500} = 0.17 \text{ mg/m}^3$$

5. Perhitungan konsentrasi NO₂ dan SO₂ dengan model box

Penentuan laju emisi per satuan luas dengan menggunakan persamaan :

$$C_e' = \frac{Q \cdot S}{U \cdot Z}$$

Dimana :

C_e = Konsentrasi zat pencemar (µg/m³)

Q = Laju emisi (µg/m².dt)

S = Panjang zona searah angin (m)

U = Kecepatan angin (m/det)

Z = Tinggi pencampuran (m)

Perhitungan konsentrasi sebagai berikut :

$$Q' \text{ NO}_2 = 0.17 \text{ mg/m}^3$$

$$\begin{aligned}
 Q' \text{ SO}_2 &= 0.12 \text{ mg/m}^3 \\
 U &= 1.53 \text{ m/s} \\
 Z &= 1260 \text{ m} \\
 S &= 30 \text{ m} \\
 \text{Cb NO}_2 &= 3.6 \text{ ppb} \\
 \text{Cb SO}_2 &= 2.3 \text{ ppb}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Konsentrasi SO}_2 = \text{Ce}' &= \frac{0.12 \times 30 \times 1000}{1.53 \times 1260} \\
 &= 1.821 \text{ } \mu\text{g /m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Ppm} &= (1.821 \text{ } \mu\text{g /m}^3 \times 24.5)/64 \\
 &= 0.697 + 2.3 = 3.0 \text{ ppb}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Konsentrasi NO}_2 = \text{Ce}' &= \frac{0.17 \times 30 \times 1000}{1.53 \times 1260} \\
 &= 2.692 \text{ } \mu\text{g /m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Ppm} &= (2.692 \text{ } \mu\text{g /m}^3 \times 24.5)/46 \\
 &= 1.434 + 3.6 = 5.0 \text{ ppb}
 \end{aligned}$$

Tabel 2. Konsentrasi SO₂ dan NO₂ Dengan Model Box di Benete Port I

Waktu	Ce (μg /m ³)		Ce (ppb)	
	SO ₂	NO ₂	SO ₂	NO ₂
00.00 – 01.00	1.2	1.7	3.5	5.3
01.00 – 02.00	1.2	1.7	3.5	5.3
02.00 – 03.00	1.2	1.7	3.5	5.3
03.00 – 04.00	1.9	2.7	4.2	6.3
04.00 – 05.00	2.0	3.0	4.3	6.6
05.00 – 06.00	2.0	2.9	4.3	6.5
06.00 – 07.00	1.9	2.8	4.2	6.4
07.00 – 08.00	1.8	2.7	4.1	6.3
08.00 – 09.00	1.9	2.7	4.2	6.3
09.00 – 10.00	2.1	3.1	4.4	6.7
10.00 – 11.00	2.0	3.0	4.3	6.6
11.00 – 12.00	2.1	3.1	4.4	6.7
12.00 – 13.00	2.0	2.9	4.3	6.5
13.00 – 14.00	2.1	3.1	4.4	6.7
14.00 – 15.00	1.9	2.8	4.2	6.4
15.00 – 16.00	2.2	3.3	4.6	6.9
16.00 – 17.00	2.2	3.4	4.5	7.0
17.00 – 18.00	1.2	1.8	3.5	5.4
18.00 – 19.00	1.2	1.8	3.5	5.4
19.00 – 20.00	1.3	1.7	3.5	5.3
20.00 – 21.00	1.2	1.7	3.5	5.3
21.00 – 22.00	1.2	1.7	3.5	5.3
22.00 – 23.00	1.3	1.8	3.6	5.4
23.00 – 00.00	1.2	1.7	3.5	5.3

Sumber : hasil perhitungan, 2026

5.2. Validasi Model

Pada penelitian ini validasi model dengan menggunakan data primer dengan menggunakan data pengukuran langsung di lapangan yang telah dilakukan oleh Departemen Lingkungan [11], PT. AMNT dengan cara pengambilan contoh atmosferik/udara ambien. Validasi model menggunakan data primer dilakukan karena mengingat model ini digunakan untuk mengestimasi konsentrasi rata – rata pencemar 1 jam, sehingga dapat menguji keabsahannya dapat dilakukan dengan dengan membandingkan output model dengan data pemantauan departemen terkait [9].

Data pengukuran lapangan yang digunakan sebagai alat validasi model adalah hasil pengukuran konsentrasi pencemar dengan cara pengambilan contoh atmosferik/udara ambien pada Benete Port I pada pukul 00.00 s.d 23.00 di Kawasan Departemen Powerplant akan dibandingkan dengan hasil estimasi konsentrasi pencemar pada Kawasan dan waktu tersebut.

Validasi model dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\% \text{ Kesalahan} = \frac{8.7-4.98}{8.7} \times 100\%$$

Dimana C merupakan konsentrasi zat pencemar.

Contoh perhitungan :

Validasi parameter pencemar untuk NO₂ dan SO₂ pada Benete Port I pada jam 07.00 – 08.00 dengan model box

Untuk NO₂ :

$$C_{ambien} = 8.7 \text{ ppb}$$

$$C_{model} = 6.3 \text{ ppb}$$

$$\% \text{ Kesalahan} = \frac{8.7-6.3}{8.7} \times 100\% = 28\%$$

Untuk SO₂ :

$$C_{ambien} = 4.1 \text{ ppb}$$

$$C_{model} = 4.1 \text{ ppb}$$

$$\% \text{ Kesalahan} = \frac{4.1-4.1}{4.1} \times 100\% = 0 \%$$

Tabel 3. Validasi Pengukuran Model Box Terhadap Parameter NO₂ dan SO₂

Waktu	SO ₂ (%)	NO ₂ (%)
00.00 – 01.00	22.8	49.8
01.00 – 02.00	20.8	42.5
02.00 – 03.00	18.4	46.9
03.00 – 04.00	18.4	45.4
04.00 – 05.00	28.2	35.3
05.00 – 06.00	34.6	50.3
06.00 – 07.00	43.5	60.7
07.00 – 08.00	0	28
08.00 – 09.00	51.9	52.4
09.00 – 10.00	38.0	35.5
10.00 – 11.00	18.4	45.4
11.00 – 12.00	19.5	23.5
12.00 – 13.00	12.1	18.4
13.00 – 14.00	34.6	50.3

14.00 – 15.00	51.9	52.4
15.00 – 16.00	12.6	15.4
16.00 – 17.00	6.7	15.8
17.00 – 18.00	12.1	18.4
18.00 – 19.00	14.4	35.2
19.00 – 20.00	19.5	23.5
20.00 – 21.00	11.8	44.3
21.00 – 22.00	5.7	10.4
22.00 – 23.00	4.2	4.3
23.00 – 00.00	0.06	9.0
Rata – Rata	20.84	33.88

Sumber : Hasil Perhitungan, 2026

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi yang telah dilakukan, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut Konsentrasi terbesar dan terkecil pada area Benete Port I dengan menggunakan model box adalah ($\text{NO}_2 = 7.1$ ppb dan $\text{SO}_2 = 5.0$ ppb) sedangkan konsentrasi terkecil adalah ($\text{NO}_2 = 6.3$ ppb dan $\text{SO}_2 = 4.1$ ppb) Validasi model terbesar dan terkecil pada area Benete Port I adalah ($\text{NO}_2 = 52.4\%$ dan $\text{SO}_2 = 51.9\%$) sedangkan validasi model terkecil adalah ($\text{NO}_2 = 4.3\%$ dan $\text{SO}_2 = 0\%$). Terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian lebih lanjut antara lain: Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang aplikasi permodelan yang lain, misalnya model Gauss terhadap emisi zat pencemar NO_2 dan SO_2 dan studi perbandingan jumlah emisi yang keluar dari unit Pembangkit Listrik Tenaga Diesel dan unit Pembangkit Listrik Tenaga Uap terhadap konsentrasi udara ambien. Pada penelitian lebih lanjut, variabel yang digunakan seperti titik sampling, jarak pengukuran dan polutan dapat ditambahkan lagi, agar validasi yang didapatkan semakin tepat dan akurat.

REFERENSI

- [1] Airgas, 'Safety Data Sheet Sulfur Dioxide', no. <https://www.airgas.com/msds/001047>. 2025.
- [2] P. Dewi, J. Tania, M. Yani, and Mujito, 'Estimasi Pola Dispersi Debu, SO_2 dan NO_x Dari Industri Semen Menggunakan Model Gauss Yang Diintegrasikan Dengan Screen 3', in *Jurnal Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan Vol.8 No.1*, 2018, pp. 109–119.
- [3] D. L. H. K. Mamuju, 'Apa Itu Polusi Udara Dan Dimana Sumber Polusi Udara'. 2023. [Online]. Available: <https://dlhkmamuju.go.id>
- [4] R. Sari, 'TRANSFORMASI INTERAKSI SOSIAL DALAM ERA DIGITAL: TANTANGAN DAN PELUANG DALAM KOMUNIKASI ONLINE', *Jurnal Media dan Komunikasi*, vol. 1, no. 2, pp. 94–96, 2024.
- [5] Indonesia, 'Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup'. 2021.
- [6] Linde, 'Safety Data Sheet Nitrogen Dioxide', *SDS*, no. 000010021798). Tersedia pada https://produkte.linde-gas.at/sdb_konform/NO2_10021798EN, 2021.
- [7] A. Masito, 'Analisis Resiko Kualitas Udara Ambien (NO_2 dan SO_2) Dan Gangguan Pernapasan Pada Masyarakat Di Wilayah Kalianak Surabaya', *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, vol. 10, no. 4, pp. 394–401, 2018.
- [8] Kemenkes, 'Bahaya Polusi Udara bagi Kesehatan : Dampak, Penyebab dan Pencegahannya'. 2024. [Online]. Available: <https://Ayosehat.kemkes.go.id>.
- [9] Y. Ristia, 'Pengendalian Pencemaran Udara', *Jurnal El-Thawalib*, vol. 3, no. 2, 2022.

-
- [10] S. Sundari, 'Efektivitas Pendekatan Realistic Mathematics Education (RME) Terhadap Kemampuan Pemecahan Masalah pada Soal Cerita', *Proximal: Jurnal Penelitian Matematika dan Pendidikan Matematika*, vol. 8, no. 3, pp. 782-791, Jul. 2025, doi: 10.30605/proximal.v8i3.6566.
- [11] P. T. A. M. N. Tenggara, 'Prinsip Keberlanjutan Dalam Bisnis : Strategi Amman Dalam Menjalankan Penambangan Yang Bertanggung Jawab'. 2026. [Online]. Available: <https://www.amman.co.id>.