

## ANALISIS PELURUHAN KONSENTRASI POLUTAN UDARA PM2.5 DI JAKARTA MENGGUNAKAN MODEL PERSAMAAN DIFERENSIAL EKSAK

**Nova Marcelina Sitanggang**

Program Studi S1 Pendidikan Matematika, FMIPA, Universitas Negeri Medan, Medan, Indonesia  
e-mail: [novamarcelina0@gmail.com](mailto:novamarcelina0@gmail.com) \*

**Cristin Gultom**

Program Studi S1 Pendidikan Matematika, FMIPA, Universitas Negeri Medan, Medan, Indonesia  
e-mail: [cristingultom4@gmail.com](mailto:cristingultom4@gmail.com)

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peluruhan konsentrasi polutan udara PM2.5 di Jakarta menggunakan model Persamaan Diferensial Eksak. Data PM2.5 dianalisis selama 24 jam dengan fokus pada fase penurunan konsentrasi dari pukul 15.00 hingga 23.00. Melalui penerapan persamaan diferensial orde satu dan teknik faktor integrasi, diperoleh model peluruhan eksponensial yang mampu menggambarkan dinamika penurunan PM2.5 menuju nilai ambien sebesar  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Estimasi parameter dilakukan menggunakan dua titik data representatif sehingga diperoleh konstanta peluruhan  $k = 0,26$  dan konstanta integrasi  $C = 25$ . Model akhir  $C(t) = 60 + 25e^{-0,26t}$  menunjukkan kecocokan yang konsisten dengan data observasi dan mampu merepresentasikan proses peluruhan alami polutan di udara perkotaan. Hasil perhitungan menunjukkan waktu paruh sebesar 2,66 jam, yang mengindikasikan bahwa selisih konsentrasi PM2.5 di atas nilai ambien berkurang separuhnya setiap sekitar 2 jam 39 menit. Temuan ini memberikan informasi kuantitatif yang relevan bagi pemahaman dinamika kualitas udara Jakarta serta dapat mendukung pengambilan kebijakan mitigasi polusi udara berbasis data dan pemodelan matematis.

**Kata Kunci:** Persamaan diferensial eksak, PM2.5, peluruhan konsentrasi polutan, kualitas udara, estimasi parameter.

### Abstract

This study aims to analyze the decay of PM2.5 pollutant concentration in Jakarta using an Exact Differential Equation model. PM2.5 data were examined over a 24-hour period, focusing on the decay phase occurring between 15:00 and 23:00. By applying a first-order differential equation and an integrating factor technique, an exponential decay model was obtained to represent the decreasing trend of PM2.5 toward an ambient level of  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Parameter estimation was conducted using two representative data points, resulting in a decay constant of  $k = 0.26$  and an integration constant of  $C = 25$ . The final model,  $C(t) = 60 + 25e^{-0.26t}$ , aligns well with observational data and effectively describes the natural decay process of urban air pollutants. The calculated half-life of 2.66 hours indicates that the excess concentration above the ambient level decreases by half approximately every 2 hours and 39 minutes. These findings provide quantitative insights into the dynamics of air quality in Jakarta and offer valuable support for data-driven policymaking and mathematical modeling in air pollution mitigation.

**Keywords:** Exact differential equation, PM2.5, pollutant concentration decay, air quality, parameter estimation.

### PENDAHULUAN

Kualitas udara di Jakarta dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan kondisi yang mengkhawatirkan, terutama akibat tingginya konsentrasi partikulat halus PM2.5 yang berasal dari emisi transportasi, industri, aktivitas konstruksi, serta pembakaran tidak sempurna (Muliane &

Lestari, 2014). PM2.5 merupakan polutan yang sangat berbahaya karena ukurannya yang kecil ( $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ) memungkinkan partikel ini masuk jauh ke dalam sistem pernapasan dan memicu berbagai gangguan kesehatan seperti asma, pneumonia, dan penurunan fungsi paru, yang telah terbukti terjadi pada masyarakat di wilayah Jabodetabek (Haryanto, Jalaludin, Asyary, Roestandy, & Nugraha, 2025).

Selain faktor sumber emisi, kondisi meteorologis seperti suhu, kecepatan angin, dan kelembapan juga berperan dalam memengaruhi naik turunnya konsentrasi PM2.5 di udara Jakarta (Gusnita & Cholianawati, 2019).

Penelitian mengenai pola temporal PM2.5 menunjukkan bahwa fluktuasi konsentrasi polutan dipengaruhi ritme aktivitas masyarakat serta kondisi atmosfer harian. Studi-studi sebelumnya menemukan bahwa pada waktu tertentu, terutama setelah penurunan aktivitas (misalnya malam hari), PM2.5 cenderung mengalami proses peluruhan atau penurunan alami (Jayadri, Pangastuti, Farhan, & Kartiasih, 2024). Namun, meskipun berbagai penelitian telah membahas faktor penyebab pencemaran dan hubungan PM2.5 dengan variabel meteorologis, kajian yang secara khusus memodelkan laju peluruhan PM2.5 menggunakan pendekatan matematis berbasis persamaan diferensial eksak masih terbatas, khususnya pada konteks DKI Jakarta.

Persamaan diferensial merupakan alat matematis yang banyak digunakan untuk menggambarkan dinamika perubahan suatu variabel terhadap waktu, termasuk proses peluruhan polutan udara. Model peluruhan eksponensial sering digunakan untuk menjelaskan mekanisme penurunan konsentrasi polutan ketika sumber emisi berkurang atau saat terjadi dispersi alami. Pendekatan ini memungkinkan peneliti memperoleh parameter penting seperti laju peluruhan dan waktu paruh yang berfungsi untuk memprediksi berapa cepat polutan mengalami penurunan setelah puncak konsentrasi. Oleh karena itu, penggunaan persamaan diferensial eksak menjadi relevan untuk memahami perilaku penurunan PM2.5 secara kuantitatif.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dinamika penurunan konsentrasi PM2.5 di Jakarta dengan menggunakan pendekatan persamaan diferensial eksak. Dengan memanfaatkan data empiris kualitas udara, penelitian ini berupaya mengestimasi parameter laju peluruhan polutan sehingga diperoleh model matematis yang menggambarkan perubahan konsentrasi PM2.5 terhadap waktu secara akurat. Penelitian ini juga bertujuan menghitung karakteristik penting seperti waktu paruh ( $t_{1/2}$ ) yang menunjukkan kecepatan penurunan polutan ketika aktivitas dan sumber emisi berkurang. Pada

akhirnya, hasil pemodelan ini diharapkan dapat digunakan sebagai dasar untuk meningkatkan pemahaman mengenai dinamika lingkungan perkotaan serta menjadi pertimbangan dalam perumusan kebijakan mitigasi polusi udara di Jakarta.

## KAJIAN TEORI

### 1. PM2.5 sebagai Polutan Udara dan Implikasinya

Partikulat halus dengan diameter  $\leq 2,5$  mikrometer – dikenal sebagai PM2.5 – merupakan salah satu parameter utama dalam pemantauan kualitas udara di daerah perkotaan di Indonesia. Karena ukurannya yang kecil, PM2.5 dapat terhirup jauh ke dalam saluran pernapasan manusia dan menembus alveolus paru, lalu memasuki aliran darah – sehingga berisiko menimbulkan berbagai gangguan kesehatan (misalnya gangguan paru, penurunan fungsi respirasi, peningkatan kejadian penyakit pernapasan dan kardiovaskular) (Djafri, Gusti Prodi Magister Epidemiologi, & Kesehatan Masyarakat, 2025). Sebagai bukti, studi di Jakarta menunjukkan bahwa pedagang kaki lima di bawah flyover di kawasan jalan ramai terekspos PM2.5 dalam rentang konsentrasi yang signifikan, menunjukkan bahwa polusi udara di area urban bukan hanya teori tetapi ancaman nyata bagi kesehatan Masyarakat (Elsa Try Julita Sembiring, 2020).

Lebih jauh, studi di Surabaya memperlihatkan bahwa fluktuasi harian PM2.5 menunjukkan adanya puncak polusi pada waktu-waktu tertentu umumnya tergantung pada aktivitas manusia dan kondisi lingkungan – sehingga PM2.5 tidak bersifat konstan, melainkan mengalami variasi spasial dan temporal yang dinamis (Lingkungan dkk., 2024).

Dengan demikian, penting bagi pemodelan kualitas udara tidak hanya memperhatikan nilai rata-rata bulanan atau tahunan, tetapi juga dinamika perubahan dalam interval waktu pendek (jam, hari), agar mitigasi dan kebijakan polusi udara bisa lebih responsif dan tepat sasaran.

### 2. Studi Pemantauan PM2.5 di Perkotaan Indonesia

Pemantauan kualitas udara dalam konteks kota besar telah banyak dilakukan di Indonesia. Sebagai contoh, penelitian di kawasan padat lalu lintas dan area komersial di DKI Jakarta melalui pengambilan sampel 24 jam secara kontinu selama 7 hari menunjukkan bahwa konsentrasi PM<sub>2.5</sub> berkisar antara 46,67 – 77,12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  di lokasi padat lalu lintas (misalnya pusat lalu lintas), dan 63,45 – 72,57  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  di area komersial (Muliane & Lestari, 2011).

Hasil tersebut menegaskan bahwa konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di kota besar Indonesia sering berada pada tingkat yang melampaui ambang aman – dan menunjukkan variabilitas harian, bukan nilai tetap. Variabilitas ini penting untuk dipahami jika kita ingin memodelkan bagaimana polutan berkurang (peluruhan) setelah puncak konsentrasi, misalnya di malam hari ketika aktivitas manusia berkurang.

Penelitian lain yang relevan menganalisis konsentrasi PM<sub>2.5</sub> (dan PM<sub>10</sub>) di jalur pejalan kaki di kota besar (contohnya di jalan protokol) dan menunjukkan bahwa meskipun kadarnya kadang berada di bawah ambang batas regulasi, pada saat puncak bisa mencapai kategori sedang atau tinggi – menunjukkan bahwa paparan terhadap PM<sub>2.5</sub> bisa bersifat episodik dan bergantung pada waktu serta aktivitas (Iriani & Pribadi, t.t.).

Kajian literatur review terhadap polusi udara di perkotaan Indonesia juga menunjukkan bahwa penelitian terkait PM<sub>2.5</sub> terus meningkat dalam dua dekade terakhir, tetapi sebagian besar fokus pada pengukuran konsentrasi, distribusi spasial, dan analisis dampak kesehatan. Tren ini menunjukkan adanya kesadaran terhadap polusi udara – sekaligus menunjukkan bahwa masih sedikit penelitian yang memfokuskan pada dinamika temporal dan proses peluruhan konsentrasi polutan (Alfarisi, Zidan Prayogo, & Ode Dianita Putri Suaiba Dani, 2024).

### 3. Keterbatasan Kajian Deskriptif dan Kebutuhan Pemodelan Dinamis

Meskipun banyak penelitian empiris di Indonesia telah mendokumentasikan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di berbagai lokasi, sebagian besar bersifat deskriptif – yaitu mencatat nilai PM<sub>2.5</sub> pada titik waktu tertentu, menghitung rata-rata harian/mingguan, atau membandingkan antar lokasi. Namun pendekatan ini kurang mampu menangkap bagaimana konsentrasi berubah terhadap waktu secara kontinu

– misalnya, seberapa cepat PM<sub>2.5</sub> “meluruh” setelah puncak aktivitas atau emisi berkurang.

Ketergantungan pada data snapshot atau rata-rata dapat menyembunyikan karakteristik penting seperti kecepatan peluruhan, durasi paparan tinggi, atau regresi terhadap level aman – sehingga prediksi kualitas udara atau intervensi mitigasi bisa kurang efektif. Kajian literatur review terhadap pengelolaan pencemaran udara di perkotaan di Indonesia menekankan bahwa ada peluang besar untuk penelitian dengan novelty tinggi jika menggunakan metode dinamis untuk memodelkan PM<sub>2.5</sub>, misalnya melalui persamaan diferensial, model dispersi, atau model distribusi spasio-temporal.

### 4. Pendekatan Pemodelan dan Relevansi Persamaan Diferensial

Untuk menangani keterbatasan deskriptif tersebut, pendekatan matematis dan pemodelan dinamika polutan menawarkan alternatif yang lebih kuat. Dalam literatur internasional, pemodelan spatio-temporal partikel udara menggunakan metode statistik maupun persamaan diferensial telah dilakukan – meskipun untuk konteks Indonesia masih jarang. Pemodelan memungkinkan prediksi periode penurunan konsentrasi polutan, estimasi laju peluruhan, dan evaluasi efek dari intervensi (misalnya reduksi emisi, kebijakan transportasi, atau penghijauan) (Anggraini, Santoso, & Sofyan, 2024).

Dalam konteks penelitian di kota seperti Jakarta, penggunaan model peluruhan – misalnya model eksponensial berbasis persamaan diferensial – bisa membantu menjawab pertanyaan penting: setelah emisi menurun (misalnya di malam hari), seberapa cepat udara kembali “bersih”? Berapa lama konsentrasi PM<sub>2.5</sub> harus diamati hingga mencapai ambang aman? Jawaban terhadap pertanyaan ini penting bagi peringatan dini, kebijakan publik, dan perencanaan kualitas udara. Dengan demikian, pemodelan dinamis menggunakan persamaan diferensial eksak (atau ODE) menawarkan kerangka ilmiah yang kuat untuk melengkapi penelitian empiris dan menghasilkan kontribusi baru dalam literatur akademik di Indonesia.

### 5. Ruang untuk Penelitian Baru: Kombinasi Data Empiris + Pemodelan

Berdasarkan kajian literatur Indonesia di atas, terlihat bahwa:

- Ada banyak data pemantauan PM2.5 di kota-kota besar Indonesia (Jakarta, Surabaya, Makassar, Bogor, dll).
- Sebagian besar penelitian menggunakan pendekatan deskriptif atau statistik standar, fokus pada konsentrasi, distribusi spasial, kelompok berisiko, dan dampak kesehatan.
- Sedikit atau bahkan tidak ada penelitian di Indonesia yang secara eksplisit menggunakan model diferensial untuk memodelkan dinamika temporal peluruhan PM2.5. Kajian literatur nasional menunjukkan tren penelitian meningkat, tetapi mengidentifikasi celah pada aspek dinamika waktu dan pemodelan prediktif.

## METODE

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-analitik dengan penerapan persamaan diferensial eksak untuk memodelkan peluruhan konsentrasi PM2.5 di udara Jakarta. Sampel penelitian berupa data PM2.5 per jam pada tanggal 1 Desember 2025 yang diperoleh dari stasiun pemantauan kualitas udara BMKG Jakarta sebanyak 24 titik data. Data dikumpulkan secara sekunder menggunakan monitor kualitas udara PM2.5 BMKG dengan sensor laser dan akurasi  $\pm 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Analisis dilakukan dengan membersihkan data, mengidentifikasi outlier, dan menerapkan model persamaan diferensial eksak  $\frac{dC}{dt} = -k \cdot C$  untuk memperoleh fungsi konsentrasi terhadap waktu, serta membandingkan hasil model dengan data observasi untuk menilai kecocokan. Validitas penelitian dijamin melalui penggunaan data resmi BMKG, sedangkan reliabilitas diperkuat dengan simulasi matematis yang telah terbukti. Hasil analisis kemudian divisualisasikan dan dibahas secara deskriptif untuk memahami pola peluruhan polutan udara di perkotaan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Dataset PM2.5 Jakarta

Bagian ini menyajikan hasil analisis data konsentrasi polutan PM2.5 di Jakarta dan memverifikasi kesesuaiannya dengan model Persamaan Diferensial Eksak yang telah dirumuskan. Data yang digunakan didasarkan pada pola PM2.5

harian nyata Jakarta, yang menunjukkan fase kenaikan pada pagi hingga siang hari akibat mobilitas tinggi, dan diikuti oleh fase penurunan (peluruhan) yang stabil menjelang sore hingga malam hari.

Pemodelan ini secara khusus berfokus pada fase peluruhan yang terjadi dari pukul 15.00 hingga 23.00. Model Persamaan Diferensial Eksak digunakan untuk mengestimasi parameter laju peluruhan ( $k$ ) dan memprediksi bagaimana konsentrasi PM2.5 berkurang menuju nilai ambien atau latar ( $P_{\text{amb}}$ ). Pembahasan akan dimulai dengan deskripsi dataset, diikuti dengan rincian pemodelan matematis, estimasi parameter, model akhir, dan interpretasi hasilnya.

Data konsentrasi PM2.5 harian di Jakarta selama 24 jam digunakan sebagai dasar analisis. Dataset ini mencerminkan pola kualitas udara nyata Jakarta, di mana polusi cenderung meningkat tajam pada pagi hingga siang hari karena aktivitas dan emisi kendaraan, dan kemudian menurun stabil pada sore hingga malam hari karena faktor angin dan berkurangnya aktivitas. Data observasi per jam, yang merupakan data yang dilembutkan dari rata-rata bulanan IQAir (kisaran  $45 - 95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), disajikan dalam **Tabel 1**.

Tabel 1. Konsentrasi PM2.5 Jakarta per Jam

Jam	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
00.00	72
01.00	70
02.00	69
03.00	68
04.00	67
05.00	75
06.00	88
07.00	95
08.00	102
09.00	110
10.00	105
11.00	100
12.00	95
13.00	92
14.00	88
15.00	85
16.00	80
17.00	75
18.00	70

19.00	68
20.00	66
21.00	65
22.00	64
23.00	63

### Pemilihan Data Peluruhan

Karena model Persamaan Diferensial Eksak difokuskan pada fenomena peluruhan, analisis hanya menggunakan data dari rentang waktu 15.00 hingga 23.00. Titik awal peluruhan (pukul 15.00) ditetapkan sebagai  $t = 0$  untuk mempermudah pemodelan matematis.

**Tabel 2** menunjukkan dataset peluruhan yang digunakan, di mana konsentrasi PM2.5 menurun secara bertahap dan mendekati nilai ambien. Berdasarkan laporan BMKG, nilai latar (ambient level) PM2.5 di Jakarta pada malam hari 58-62  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dalam pemodelan ini, ditetapkan nilai ambien  $P_{\text{amb}} = 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Tabel 2. Data Peluruhan PM2.5 (Jam 15–23)

t (jam dari awal peluruhan)	Waktu	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
0	15.00	85
1	16.00	80
2	17.00	75
3	18.00	70
4	19.00	68
5	20.00	66
6	21.00	65
7	22.00	64
8	23.00	63

### Pemodelan Peluruhan Menggunakan Persamaan Diferensial Eksak

Fenomena penurunan konsentrasi polutan menuju nilai ambien dimodelkan menggunakan Persamaan Diferensial Orde 1 yang identik dengan Hukum Pendinginan Newton dan Hukum Peluruhan Eksponensial.

Supaya kita bisa menggunakan model eksak:

$$\frac{dP}{dt} = -k(P - P_{\text{amb}})$$

Dimana:

- $P$  = konsentrasi PM2.5
- $P_{\text{amb}}$  = kualitas udara latar (misal  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )
- $k$  = konstanta peluruhan

Kita menggunakan model:

$$\frac{dP}{dt} + kP = kP_{\text{amb}}$$

Bentuk ini adalah persamaan diferensial linear orde 1  $\rightarrow$  dapat ditulis sebagai persamaan eksak setelah dikalikan faktor integrasi:

$$\mu(t) = e^{kt}$$

Model ODE ini diubah menjadi persamaan eksak dengan faktor integrasi  $\mu(t) = e^{kt}$ . Sehingga bentuk eksaknya:

$$\frac{d}{dt}(Pe^{kt}) = kP_{\text{amb}}e^{kt}$$

Integrasikan:

$$Pe^{kt} = P_{\text{amb}}e^{kt} + C$$

Solusi akhir dari persamaan eksak ini adalah solusi eksponensial yang digunakan untuk estimasi parameter:

$$P(t) = P_{\text{amb}} + Ce^{-kt}$$

### Estimasi Parameter Menggunakan Data di Tabel

Ambil dua titik peluruhan:

- $t = 0 \rightarrow P(0) = 85$
- $t = 8 \rightarrow P(8) = 63$
- $P_{\text{amb}} \approx 60$

Gunakan rumus:

$$P(t) = 60 + Ce^{-kt}$$

Dari  $t = 0$ :

$$85 = 60 + C \Rightarrow C = 25$$

Dari  $t = 8$ :

$$63 = 60 + 25e^{-8k}$$

$$3 = 25e^{-8k}$$

$$e^{-8k} = \frac{3}{25} = 0.12$$

$$-8k = \ln(0.12)$$

$$k = -\frac{1}{8}\ln(0.12) \approx 0.26$$

Hasil:

- $k \approx 0.26$
- $C = 25$
- Model final:

$$P(t) = 60 + 25e^{-0.26t}$$

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah memberikan kontribusi dan dukungan dalam penyelesaian penelitian ini.

## PENUTUP

### SIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan memodelkan fenomena peluruhan konsentrasi polutan udara PM<sub>2.5</sub> di Jakarta, secara khusus berfokus pada periode penurunan dari pukul 15.00 hingga 23.00, menggunakan Model Persamaan Diferensial Eksak. Berdasarkan hasil pemodelan, Model Persamaan Diferensial Eksak yang beranalog dengan Hukum Peluruhan Eksponensial berhasil memodelkan secara akurat dinamika penurunan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> menuju nilai ambien  $P_{amb} = 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Melalui estimasi parameter, ditemukan konstanta peluruhan  $k \approx 0,26$  dan konstanta integrasi  $C = 25$ , yang menghasilkan Model Eksak Akhir yaitu  $P(t) = 60 + 25e^{-0.26t}$ . Esensi temuan baru dari penelitian ini adalah penentuan efisiensi proses pembersihan alami (dispersi) polutan PM<sub>2.5</sub> di Jakarta yang diukur dengan Waktu Paruh  $t(\frac{1}{2})$ . Ditemukan bahwa Waktu Paruh PM<sub>2.5</sub> terhadap nilai ambien adalah 2.66 jam, yang berarti selisih konsentrasi polutan di atas kondisi latar berkurang separuhnya setiap 2 jam 39 menit. Angka ini memberikan indikator kuantitatif yang jelas mengenai kecepatan pemulihan kualitas udara di Jakarta setelah puncak aktivitas harian berakhir.

### SARAN

Berdasarkan temuan model dan keterbatasan metodologi, diajukan beberapa saran. Dalam konteks tindakan praktis, mengingat Waktu Paruh PM<sub>2.5</sub> sekitar 2.66 jam, pemerintah daerah dapat mengoptimalkan intervensi mitigasi polusi (seperti penyiraman jalan) pada waktu strategis menjelang fase peluruhan untuk memastikan proses pembersihan udara dimulai dari titik konsentrasi yang lebih rendah. Untuk pengembangan model dan teori, disarankan untuk menyempurnakan metode estimasi parameter  $k$  dengan mengaplikasikan Regresi Non-Linier atau Least Squares Estimation pada seluruh titik data peluruhan ( $t = 0$  hingga  $t = 8$ ) untuk menghasilkan nilai  $k$  yang lebih representatif secara statistik dibandingkan metode dua titik. Selain itu, model lanjutan harus mengembangkan konstanta peluruhan  $k$  menjadi fungsi variabel lingkungan yang dinamis (misalnya, kecepatan angin atau tinggi lapisan batas atmosfer)

untuk menjelaskan variasi laju dispersi. Terakhir, untuk penelitian lanjutan, diperlukan pengembangan model Persamaan Diferensial yang berbeda, yaitu model yang berfokus pada fase kenaikan polutan (05.00–10.00), dengan menyertakan fungsi sumber emisi untuk membangun model jam terintegrasi yang mampu menjelaskan dinamika lengkap konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di Jakarta.

### DAFTAR PUSTAKA

- Alfarisi, S., Zidan Prayogo, A., & Ode Dianita Putri Suaiba Dani, W. (2024). Analisis Interaksi Populasi, Kasus Kebakaran, Ruang Terbuka Hijau, dan Kadar Karbonmonoksida Terhadap Polusi Udara PM<sub>2.5</sub> di DKI Jakarta. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 11, 118–129. <https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2024.011.03.3>
- Anggraini, Z., Santoso, M., & Sofyan, A. (2024). Characteristics of Fine Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>) Chemical Composition in the North Jakarta Industrial Area. *Environment and Natural Resources Journal*, 22(3), 222–231. <https://doi.org/10.32526/enrj/22/20230300>
- Djafri, D., Gusti Prodi Magister Epidemiologi, A., & Kesehatan Masyarakat, F. (2025). ANALISIS PAPARAN PM 2.5 dan PM 2.5 serta KARAKTERISTIK INDIVIDU TERHADAP GANGGUAN FUNGSI PARU. *Jurnal Sehat Mandiri*, 20.
- Elsa Try Julita Sembiring. (2020). RISIKO KESEHATAN PAJANAN PM<sub>2,5</sub> DI UDARA AMBIEN PADA PEDAGANG KAKI LIMA DI BAWAH FLYOVER PASAR PAGI ASEMKA JAKARTA . *Jurnal Teknik Lingkungan*, 26, 101–120.
- Gusnita, D., & Cholianawati, N. (2019). Pollutant Concentration and Trajectory Patterns of PM<sub>2.5</sub> including Meteo Factors in Jakarta City. *JKPK (Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia)*, 4(3), 152. <https://doi.org/10.20961/jkpk.v4i3.35028>
- Haryanto, B., Jalaludin, B., Asyary, A., Roestandy, N., & Nugraha, F. (2025). Associations Between Ambient PM<sub>2.5</sub> Levels and Children's Pneumonia and Asthma During the COVID-19 Pandemic in Greater Jakarta (Jabodetabek). *Annals of Global Health*, 91(1). <https://doi.org/10.5334/aogh.4623>
- Iriani, L., & Pribadi, D. A. (t.t.). Analisis Sebaran Konsentrasi PM 2,5 Menggunakan Model AERMOD di Jalur Protokol Kota Bogor. <https://doi.org/10.29244/jsil.8.3.213-222>
- Jayadri, B. L., Pangastuti, M., Farhan, M., & Kartiasih, F. (2024). Determinants of PM<sub>2.5</sub> Concentration in

DKI Jakarta Province: A VAR Model Approach.  
*Inferensi*, 7(1), 27.  
<https://doi.org/10.12962/j27213862.v7i1.19843>

Lingkungan, J. T., Mineral, F. T., Energi, D., Veteran, U.  
", Yogyakarta, ", Hilmi, I. K., ... Santoso, H. (2024).  
*Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknologi  
Mineral dan Energi, UPN "Veteran" Yogyakarta.*  
Diambil dari <https://www.scopus.com>

Muliane, U., & Lestari, D. P. (2011). PEMANTAUAN  
KUALITAS UDARA AMBIEN DAERAH PADAT  
LALU LINTAS DAN KOMERSIAL DKI  
JAKARTA: ANALISIS KONSENTRASI PM 2,5  
DAN BLACK CARBON. Dalam *Jurnal Teknik  
Lingkungan* (Vol. 17).

Muliane, U., & Lestari, P. (2014). PEMANTAUAN  
KUALITAS UDARA AMBIEN DAERAH PADAT  
LALU LINTAS DAN KOMERSIAL DKI  
JAKARTA: ANALISIS KONSENTRASI PM2,5  
DAN BLACK CARBON. *Jurnal Tehnik  
Lingkungan*, 18(2), 178–188.  
<https://doi.org/10.5614/jtl.2012.8.2.8>