

Analisis Rata-rata PM_{2.5} Di Surabaya Raya Tahun 2024–2025 terhadap Baku Mutu Nasional dalam Perspektif Kesehatan Masyarakat

Shaila Rizka Annabila^{1*}, Aditya Pawitra Sukma², Khuliyah Candraning Diyanah³
Universitas Airlangga, Indonesia^{1,2,3}

*Corresponding author: shaila.rizka.annabila-2022@fkm.unair.ac.id

Abstrak: Pencemaran udara akibat partikulat halus berukuran $\leq 2,5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}) merupakan salah satu permasalahan kesehatan lingkungan yang paling serius di kawasan perkotaan. Paparan PM_{2.5} diketahui berhubungan dengan peningkatan risiko penyakit kardiovaskular, gangguan pernapasan, penyakit tidak menular, serta kematian dini. Kawasan Surabaya Raya sebagai salah satu wilayah metropolitan terbesar di Indonesia memiliki aktivitas transportasi, industri, dan permukiman yang tinggi sehingga berpotensi mengalami peningkatan konsentrasi PM_{2.5}. Penelitian ini bertujuan menganalisis rata-rata konsentrasi PM_{2.5} di Kawasan Surabaya Raya periode 2024–2025 serta membandingkannya dengan baku mutu udara ambien nasional dari perspektif kesehatan masyarakat. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif-analitik berbasis data sekunder yang diperoleh dari Direktorat Perlindungan dan Pengelolaan Mutu Udara. Analisis dilakukan secara spasial-temporal dan komparatif dengan mempertimbangkan cakupan hari pemantauan pada masing-masing wilayah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada tahun 2024 konsentrasi PM_{2.5} tertinggi ditemukan di Kabupaten Mojokerto (49,43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Kabupaten Sidoarjo (34,26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), dan Kota Surabaya (27,92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Sementara itu, pada tahun 2025 konsentrasi tertinggi tercatat di Kabupaten Sidoarjo (29,60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) dan Kabupaten Mojokerto (19,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Sebagian besar wilayah memiliki konsentrasi PM_{2.5} yang melampaui baku mutu tahunan nasional sebesar 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Temuan ini mengindikasikan adanya risiko kesehatan masyarakat yang berkelanjutan akibat paparan PM_{2.5} serta menunjukkan perlunya penguatan sistem pemantauan kualitas udara yang lebih merata, peningkatan pengendalian emisi dari sektor transportasi dan industri, serta implementasi kebijakan berbasis bukti untuk mendukung upaya promotif dan preventif dalam perlindungan kesehatan masyarakat.

Kata kunci: Baku mutu udara; Kesehatan masyarakat; PM_{2.5}; Pemantauan kualitas udara; Surabaya Raya.

Abstract: Air pollution caused by fine particulate matter measuring $\leq 2.5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}) is one of the most serious environmental health challenges in urban areas. Exposure to PM_{2.5} has been associated with an increased risk of cardiovascular diseases, respiratory disorders, non-communicable diseases, and premature mortality. As one of Indonesia's largest metropolitan regions, Greater Surabaya is characterized by intensive transportation, industrial, and residential activities that may contribute to elevated PM_{2.5} concentrations. This study aims to analyze the average PM_{2.5} concentrations in the Greater Surabaya Region during 2024–2025 and compare them with the Indonesian national ambient air quality standards from a public health perspective. A descriptive-analytical approach was employed using secondary data obtained from the Directorate of Air Quality Protection and Management. Spatial-temporal and comparative analyses were conducted while considering the monitoring-day coverage of each study area. The results revealed that, in 2024, the highest PM_{2.5} concentrations were recorded in Mojokerto Regency (49.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Sidoarjo Regency (34.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), and Surabaya City (27.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). In 2025, the highest concentrations were observed in Sidoarjo Regency (29.60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) and Mojokerto Regency (19.36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Most areas exhibited PM_{2.5} concentrations exceeding the national annual air quality standard of 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. These findings indicate persistent public health risks associated with long-term PM_{2.5} exposure and highlight the need for strengthening air quality monitoring systems, enhancing emission control measures in transportation and industrial sectors, and implementing evidence-based policies to support promotive and preventive public health interventions.

Keywords: Air quality standards; Public health; PM_{2.5}; Air quality monitoring; Greater Surabaya.

Pendahuluan

Pencemaran udara merupakan salah satu masalah kesehatan lingkungan yang signifikan, terutama di wilayah perkotaan dengan aktivitas antropogenik tinggi. Menurut *World Health*

Organization (WHO), menunjukkan bahwa perpaduan polusi ambien (luar ruang) dan udara domestik (dalam ruang) menjadi penyebab kematian dini sekitar 6,7 juta setiap tahunnya di seluruh dunia. Pada 2019, dari angka tersebut, polusi udara ambien menyumbang 4,2 juta kematian dini dan 99% populasi dunia hidup di daerah yang memiliki kualitas udara melebihi standar anjuran WHO. Penyakit yang diakibatkan juga berkaitan dengan kardiovaskular dan respiratori (WHO, 2024).

Salah satu parameter utama dalam menilai kualitas udara ambien adalah *Particulate Matter* berukuran $\leq 2.5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}) yang dapat masuk ke saluran pernapasan bawah sehingga meningkatkan risiko gangguan kardiovaskular dan respiratori. PM_{2.5} merupakan fraksi partikulat halus yang mampu menembus hingga alveoli paru dan memasuki sistem sirkulasi darah. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa paparan jangka panjang PM_{2.5} berhubungan dengan peningkatan risiko penyakit kardiovaskular, gangguan respiratori, penyakit tidak menular, serta kematian dini (Burnett *et al.*, 2018; Chen & Hoek, 2020).

Temuan tersebut menjadi dasar bagi WHO untuk memperketat pedoman kualitas udara global dan menegaskan bahwa risiko kesehatan masih dapat terjadi bahkan pada konsentrasi yang relatif rendah (WHO, 2021). Hal ini menegaskan bahwa tidak ada ambang batas yang aman untuk pajanan PM_{2.5}. Selain itu, juga menegaskan pentingnya pemantauan dan pengendalian PM_{2.5} secara berkelanjutan, khususnya di kawasan metropolitan dengan aktivitas transportasi dan industri tinggi. Berbagai penelitian sebelumnya telah menunjukkan adanya hubungan antara pajanan PM_{2.5} dengan dampak kesehatan masyarakat, termasuk peningkatan tekanan darah dan gangguan kesehatan kronis di wilayah perkotaan (Madrigano *et al.*, 2024).

Kawasan Surabaya merupakan kawasan kota metropolitan terbesar kedua di Indonesia dengan aktivitas transportasi, industri, dan permukiman yang padat dan saling terhubung. Kawasan ini mencakup Kabupaten Gresik, Kabupaten Bangkalan, Kabupaten Mojokerto, Kota Mojokerto, Kota Surabaya, Kabupaten Sidoarjo, dan Kabupaten Lamongan. Kawasan ini secara resmi diatur dalam Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 66 Tahun 2022 (Peraturan Presiden Nomor 66 Tahun 2022 Tentang Rencana Tata Ruang Kawasan Strategis Nasional Gerbangkertosusila, 2022). Kawasan ini juga memiliki jaringan stasiun pemantauan kualitas udara ambien cenderung lengkap untuk analisis indikatif pola PM_{2.5} berdasarkan data sekunder.

Meskipun berbagai studi telah mengkaji pencemaran udara di kota-kota besar Indonesia, kawasan Surabaya Raya memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan wilayah metropolitan lainnya. Kawasan ini merupakan pusat aktivitas ekonomi dan industri di Jawa Timur yang ditandai oleh tingginya mobilitas penduduk, keberadaan kawasan industri manufaktur, pelabuhan internasional, serta jaringan transportasi darat yang menghubungkan beberapa kabupaten dan

kota secara intensif. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan emisi partikulat halus dari sumber bergerak maupun sumber tidak bergerak sehingga memengaruhi kualitas udara regional secara lintas wilayah (Lelieveld *et al.*, 2015; Komilova *et al.*, 2023). Selain itu, Surabaya Raya merupakan kawasan dengan jumlah penduduk lebih dari 10 juta jiwa sehingga potensi dampak kesehatan akibat paparan PM_{2.5} menjadi isu kesehatan masyarakat yang penting untuk dikaji secara berkelanjutan.

Berbagai penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada hubungan antara paparan PM_{2.5} dan dampak kesehatan, pemodelan spasial pencemaran udara, atau evaluasi kualitas udara pada kota tertentu (Burnett *et al.*, 2018; Chen & Hoek, 2020; Madrigano *et al.*, 2024). Namun, masih terdapat keterbatasan penelitian yang secara khusus membandingkan konsentrasi PM_{2.5} antarwilayah dalam satu kawasan metropolitan terintegrasi dengan mempertimbangkan cakupan hari pemantauan sebagai faktor representativitas data. Selain itu, kajian yang menghubungkan hasil pemantauan PM_{2.5} terbaru periode 2024–2025 dengan evaluasi terhadap baku mutu nasional pada skala Surabaya Raya masih sangat terbatas. Kesenjangan penelitian (*research gap*) tersebut menunjukkan perlunya analisis yang tidak hanya menilai besarnya konsentrasi PM_{2.5}, tetapi juga mengevaluasi kualitas data pemantauan sebagai dasar interpretasi risiko kesehatan masyarakat.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi analisis konsentrasi PM_{2.5} terbaru periode 2024–2025 dengan evaluasi cakupan hari pemantauan pada setiap wilayah di Kawasan Surabaya Raya. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya hanya melaporkan konsentrasi polutan atau dampak kesehatannya, penelitian ini mempertimbangkan representativitas data pemantauan dalam proses interpretasi hasil sehingga menghasilkan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi kualitas udara dan implikasinya terhadap kesehatan masyarakat. Pendekatan ini penting karena ketimpangan cakupan pemantauan dapat memengaruhi estimasi konsentrasi rata-rata dan berpotensi menimbulkan bias dalam penilaian risiko lingkungan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini menganalisis nilai rata-rata PM_{2.5} secara indikatif dengan mempertimbangkan cakupan hari pemantauan di Kawasan Surabaya Raya menggunakan data terbaru periode 2024–2025. Namun, adanya variasi nilai rata-rata PM_{2.5} antarwilayah di Kawasan Surabaya dan belum seragamnya cakupan hari pemantauan berpotensi memengaruhi interpretasi hasil. Selain itu, penting untuk mengetahui perbandingan nilai rata-rata PM_{2.5} dan perbandingannya dengan baku mutu nasional. Baku mutu nasional parameter PM_{2.5} diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, yakni 55 µg/m³ untuk rata-rata 24 jam dan 15 µg/m³ untuk rata-rata 1 tahun sebagai dasar evaluasi regulatif (Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, 2021).

Pajanan PM_{2.5} dalam jangka panjang diketahui berkaitan dengan peningkatan risiko gangguan pernapasan, penyakit kardiovaskular, serta berbagai penyakit tidak menular yang berkontribusi terhadap meningkatnya beban kesehatan masyarakat. Oleh karena itu, pemantauan kualitas udara menjadi komponen penting dalam upaya promotif dan preventif untuk mengurangi risiko kesehatan akibat pencemaran udara (WHO, 2021; Burnett *et al.*, 2018). Oleh karena itu, pemantauan kualitas udara menjadi penting dalam upaya promotif dan preventif kesehatan masyarakat. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi spasial dan temporal konsentrasi PM_{2.5} di Kawasan Surabaya Raya periode 2024–2025, mengevaluasi keterkaitannya dengan cakupan pemantauan yang tersedia, serta membandingkan hasilnya dengan baku mutu udara ambien nasional sebagai dasar identifikasi wilayah prioritas pengendalian pencemaran udara dari perspektif kesehatan masyarakat.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-analitik berbasis data sekunder untuk mengevaluasi distribusi spasial dan temporal konsentrasi PM_{2.5} di Kawasan Surabaya Raya. Pendekatan ini dipilih untuk menyediakan gambaran awal (*baseline assessment*) mengenai kondisi kualitas udara ambien, serta memungkinkan identifikasi variasi antarwilayah dan antarperiode yang menjadi dasar dalam interpretasi hasil dan pembahasan.

Wilayah studi secara operasional mencakup Kabupaten Gresik, Kabupaten Mojokerto, Kota Mojokerto, Kota Surabaya, Kabupaten Sidoarjo, dan Kabupaten Lamongan. Kabupaten Bangkalan tidak termasuk dalam analisis karena keterbatasan ketersediaan data pemantauan. Data yang dianalisis meliputi periode tahun 2024 hingga 2025, dengan tahun 2024 digunakan sebagai periode utama karena memiliki cakupan pemantauan yang lebih representatif, sedangkan data tahun 2025 diperlakukan sebagai data awal (*preliminary*) karena belum mencakup satu tahun penuh. Pemilihan dua periode ini bertujuan untuk memungkinkan analisis komparatif antarwaktu sebagaimana disajikan dalam hasil penelitian.

Sumber data berupa nilai rata-rata konsentrasi PM_{2.5} dan jumlah hari pemantauan pada masing-masing wilayah diperoleh melalui koordinasi dengan Direktorat Perlindungan dan Pengelolaan Mutu Udara. Variabel jumlah hari pemantauan secara khusus diikutsertakan dalam analisis sebagai faktor kontekstual yang memengaruhi representativitas nilai rata-rata, sehingga menjadi dasar dalam pembahasan terkait kualitas dan keterbatasan data.

Pengolahan data dilakukan melalui kompilasi dan klasifikasi berdasarkan wilayah dan periode pengamatan, yang kemudian diikuti dengan evaluasi cakupan hari pemantauan untuk mengidentifikasi ketimpangan data antarwilayah. Tahapan ini menjadi penting untuk menjelaskan

perbedaan hasil antarwilayah, khususnya pada wilayah dengan cakupan pemantauan terbatas yang berpotensi menghasilkan estimasi rata-rata yang kurang representatif.

Analisis data dilakukan secara deskriptif-komparatif dengan membandingkan nilai rata-rata PM_{2.5} antarwilayah dan antarperiode. Analisis ini secara langsung mendukung identifikasi wilayah dengan konsentrasi relatif lebih tinggi, sebagaimana ditampilkan dalam hasil penelitian, serta menjadi dasar dalam pembahasan mengenai faktor indikatif yang memengaruhi variasi tersebut, seperti aktivitas antropogenik dan karakteristik wilayah. Selanjutnya, nilai rata-rata PM_{2.5} dibandingkan dengan baku mutu udara ambien nasional sesuai Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 sebesar 15 µg/m³ untuk rata-rata tahunan. Perbandingan ini digunakan sebagai kerangka evaluatif dalam pembahasan untuk menilai tingkat pencemaran udara serta implikasinya terhadap kesehatan masyarakat.

Interpretasi hasil dilakukan secara kontekstual dengan mempertimbangkan variasi cakupan hari pemantauan, ketidaklengkapan data pada tahun 2025, serta perbedaan ketersediaan data antarwilayah, termasuk tidak tersedianya data pada wilayah tertentu dalam periode tertentu. Oleh karena itu, hasil penelitian ini diposisikan sebagai analisis indikatif yang menekankan pada pola distribusi dan perbandingan relatif, bukan sebagai estimasi absolut kondisi kualitas udara. Dengan pendekatan tersebut, metode ini secara langsung mendukung alur hasil dan pembahasan, khususnya dalam menjelaskan variasi nilai PM_{2.5}, pengaruh cakupan pemantauan terhadap interpretasi data, dan penentuan wilayah prioritas dalam pengendalian pencemaran udara berbasis kesehatan masyarakat.

Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis awal mengindikasikan adanya variasi konsentrasi PM_{2.5} antarwilayah di Kawasan Surabaya Raya pada tahun 2024. Data ini menjadi dasar dalam menentukan wilayah prioritas untuk pengendalian udara dari perspektif kesehatan masyarakat.

Tabel 1. Cakupan Hasil Pemantauan dan Rata-rata PM_{2.5} Tahun 2024 di Kawasan Surabaya Raya

Wilayah/Stasiun	Cakupan Pemantauan Tahun 2024	Rata-rata PM _{2.5} Tahun 2024 (µg/m ³)
Kab. Gresik (Kebomas)	Februari – Desember (308 hari)	14,7179
Kab. Mojokerto (Mojosari)	Februari – Desember (295 hari)	49,4264
Kota Mojokerto (Magersari)	Desember (8 hari)	14,7685
Kota Surabaya (Tandes)	Januari – Desember (356 hari)	27,9185
Kab. Sidoarjo (Buduran)	Februari – Desember (311 hari)	34,2614
Kab. Lamongan	Desember (10 hari)	25,2797

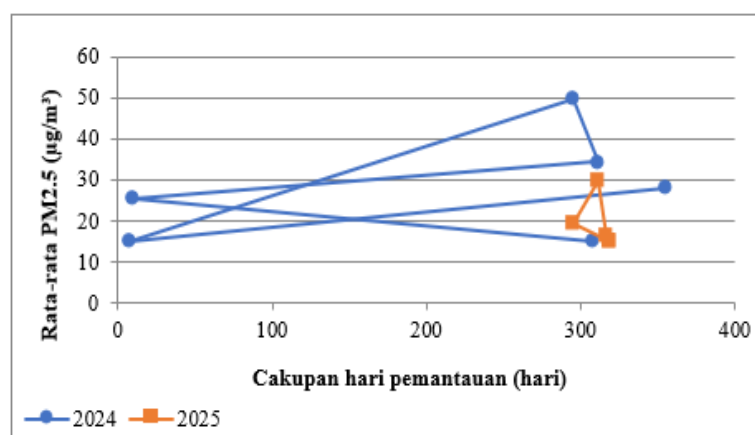
Tabel 1 menunjukkan variasi cakupan pemantauan tahun 2024 dengan Kota Surabaya, Kab. Gresik, Sidoarjo, dan Mojokerto memiliki periode lebih lama, sedangkan Kota Mojokerto dan Kab. Lamongan terbatas pada Desember. Konsentrasi PM_{2.5} tertinggi di Kab. Mojokerto, kemudian diikuti Kab. Sidoarjo dan Kota Surabaya.

Tabel 2. Cakupan Hasil Pemantauan dan Rata-rata PM_{2.5} Tahun 2025 di Kawasan Surabaya Raya

Wilayah/Stasiun	Cakupan Pemantauan Tahun 2025	Rata-rata PM _{2.5} Tahun 2025 (µg/m ³)
Kab. Gresik (Kebomas)	1 Januari – 17 November (319 hari)	14,8970
Kab. Mojokerto (Mojosari)	1 Januari – 17 November (295 hari)	19,3600
Kota Mojokerto (Magersari)	1 Januari – 17 November (319 hari)	14,9136
Kota Surabaya (Tandes)	Data tahun 2025 tidak tersedia	-
Kab. Sidoarjo (Buduran)	1 Januari – 13 November (311 hari)	29,6033
Kab. Lamongan	1 Januari – 17 November (317 hari)	16,0613

Tabel 2 menunjukkan cakupan pemantauan lebih panjang dan konsisten hingga pertengahan November 2025 di sebagian besar wilayah, meskipun belum mencakup satu tahun penuh. Data Kota Surabaya (Tandes) tidak dianalisis karena ketiadaan dataset dengan rata-rata PM_{2.5} tertinggi tercatat di Kabupaten Sidoarjo dibandingkan Kota Mojokerto dan Kabupaten Gresik.

Hasil pada Tabel 1 dan 2 disajikan dalam visualisasi berikut agar memperjelas perbedaan cakupan pemantauan dan rata-rata antarwilayah tahun 2024–2025.



Gambar 1. Hubungan Cakupan Pemantauan dan Rata-rata PM_{2.5} 2024–2025

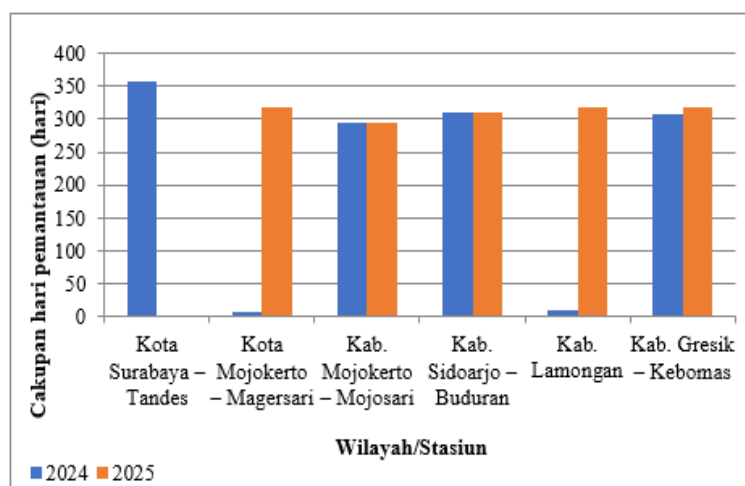
Hasil analisis menunjukkan adanya variasi signifikan pada konsentrasi PM_{2.5} antarwilayah di Kawasan Surabaya Raya tahun 2024–2025. Pada tahun 2024, konsentrasi PM_{2.5} tertinggi teridentifikasi di Kabupaten Mojokerto sebesar 49,43 µg/m³, diikuti oleh Kabupaten Sidoarjo dan

Kota Surabaya. Nilai tersebut secara substansial melampaui baku mutu tahunan nasional sebesar $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, yang mengindikasikan adanya tekanan pencemaran udara cukup tinggi pada wilayah tersebut.

Pada tahun 2025, terjadi perubahan pola distribusi, di mana Kabupaten Sidoarjo menunjukkan konsentrasi tertinggi sebesar $29,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan di wilayah lain seperti Kabupaten Mojokerto menunjukkan penurunan relatif dibandingkan tahun sebelumnya. Meskipun demikian, sebagian besar wilayah masih berada di atas atau mendekati ambang batas baku mutu, yang menunjukkan bahwa permasalahan kualitas udara di kawasan ini bersifat persisten.

Variasi antarwilayah ini mencerminkan heterogenitas sumber emisi dan karakteristik wilayah metropolitan. Kawasan dengan aktivitas industri dan transportasi yang tinggi cenderung menunjukkan konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$ yang lebih besar, sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa sektor transportasi dan industri merupakan kontributor utama $\text{PM}_{2.5}$ di wilayah perkotaan (Lelieveld *et al.*, 2015; Santoso *et al.*, 2011; Komilova *et al.*, 2023). Selain itu, dinamika urbanisasi dan pertumbuhan kendaraan bermotor juga berkontribusi dalam peningkatan partikulat di kawasan metropolitan.

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa cakupan hari pemantauan memiliki peran krusial dalam menentukan representativitas nilai rata-rata $\text{PM}_{2.5}$. Pada Gambar 2 secara khusus menyoroti perbedaan cakupan pemantauan antarwilayah pada tahun 2024–2025.

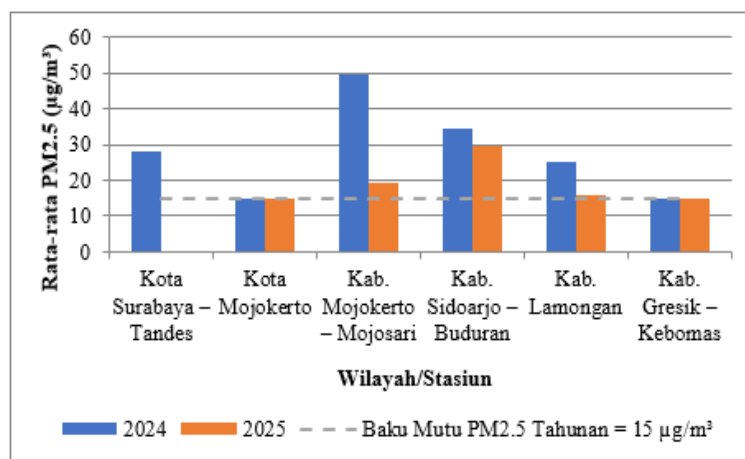


Gambar 2. Perbandingan Cakupan Harian Pemantauan $\text{PM}_{2.5}$ 2024–2025

Pada tahun 2024, terdapat ketimpangan cakupan pemantauan antarwilayah, di mana beberapa wilayah seperti Kota Mojokerto dan Kabupaten Lamongan hanya memiliki data pemantauan dalam periode yang sangat terbatas. Kondisi ini berpotensi menghasilkan estimasi rata-rata yang kurang stabil dan tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi tahunan. Sebaliknya, pada tahun 2025 cakupan pemantauan relatif lebih konsisten di sebagian besar wilayah, sehingga meningkatkan reliabilitas data. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas data

pemantauan tidak hanya ditentukan oleh nilai konsentrasi, tetapi juga oleh kontinuitas dan kelengkapan pengukuran.

Selanjutnya, Gambar 3 menampilkan perbandingan nilai rata-rata PM_{2.5} pada tahun 2024–2025 setiap wilayah/stasiun dengan garis konteks Baku Mutu PM_{2.5} Tahunan = 15 µg/m³.



Gambar 3. Rata-rata PM_{2.5} 2024–2025 dengan Baku Mutu Tahunan

Pada tahun 2024, Kabupaten Mojokerto, Kabupaten Sidoarjo, dan Kota Surabaya menunjukkan nilai relatif tinggi. Namun, cakupan pemantauan tahun 2024 sangat terbatas pada Kabupaten Lamongan. Pada tahun 2025, Kabupaten Lamongan hampir mencapai baku mutu tahunan, sedangkan Kabupaten Sidoarjo dan Kabupaten Mojokerto masih menunjukkan nilai relatif tinggi. Pada tahun 2025, data Kota Surabaya tidak ditampilkan karena dataset tidak tersedia. Dalam konteks epidemiologi lingkungan, ketidaklengkapan data dapat menimbulkan bias dalam interpretasi risiko pajanan, terutama jika data yang tersedia tidak mencerminkan variasi musiman atau fluktuasi harian polutan (Dominici *et al.*, 2006). Oleh karena itu, evaluasi kualitas udara harus mempertimbangkan aspek cakupan data sebagai bagian integral dari analisis.

Variasi konsentrasi PM_{2.5} antarwilayah diduga dipengaruhi oleh kombinasi faktor antropogenik dan faktor lingkungan. Aktivitas transportasi yang tinggi, terutama pada kawasan dengan mobilitas komuter yang intens, berkontribusi signifikan terhadap emisi partikulat halus. Selain itu, keberadaan kawasan industri dan pembakaran bahan bakar fosil juga menjadi sumber utama emisi PM_{2.5}. Di kawasan urban dengan emisi tinggi, pembentukan partikel sekunder dari reaksi kimia di atmosfer turut memperburuk kualitas udara ambien (He *et al.*, 2024; Du *et al.*, 2016).

Faktor meteorologi, seperti kecepatan angin, suhu, dan stabilitas atmosfer turut memengaruhi proses dispersi atau akumulasi polutan. Kondisi atmosfer yang stabil dapat menyebabkan akumulasi polutan di lapisan bawah atmosfer sehingga meningkatkan konsentrasi PM_{2.5} secara lokal (Seinfeld & Pandis, 2016). Selain itu, kontribusi partikel sekunder yang terbentuk dari reaksi

kimia gas prekursor di atmosfer juga menjadi faktor penting dalam meningkatkan konsentrasi PM_{2.5}, terutama di kawasan metropolitan dengan tingkat emisi yang tinggi.

Pajanan PM_{2.5} memiliki implikasi signifikan terhadap kesehatan masyarakat, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. WHO menyatakan bahwa tidak terdapat ambang batas aman untuk pajanan PM_{2.5}, sehingga peningkatan konsentrasi sekecil apa pun tetap berpotensi menimbulkan dampak kesehatan (WHO, 2021). Pajanan PM_{2.5} berkontribusi dalam peningkatan risiko penyakit kardiovaskular dan dampak kesehatan kronis lainnya (Adkins *et al.*, 2022; Tessum *et al.*, 2021).

Selain itu, studi terbaru juga menunjukkan adanya hubungan antara pajanan PM_{2.5} dengan peningkatan tekanan darah dan gangguan metabolik pada populasi dewasa yang dalam jangka panjang dapat berkembang menjadi penyakit tidak menular, seperti penyakit paru obstruktif kronis (PPOK), infeksi saluran pernapasan, dan gangguan kronis lainnya (Madrigano *et al.*, 2024; He *et al.*, 2024). Dalam konteks kesehatan masyarakat perkotaan, kondisi ini dapat meningkatkan beban penyakit, menurunkan produktivitas, serta meningkatkan biaya kesehatan secara signifikan. Secara global, salah satu faktor risiko utama kematian dini, terutama di negara berkembang, adalah beban penyakit akibat pencemaran udara yang terus meningkat (Burnett *et al.*, 2018; Y. Chen *et al.*, 2023). Oleh karena itu, pengendalian pencemaran udara menjadi intervensi penting dalam upaya promotif dan preventif kesehatan masyarakat.

Kesimpulan

Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa nilai rata-rata PM_{2.5} tahun 2024-2025 di beberapa wilayah utama Kawasan Surabaya Raya, seperti Mojokerto, Sidoarjo, dan Surabaya melebihi baku mutu nasional 15 µg/m³ dengan garis signifikan yang disebabkan perbedaan cakupan pemantauan dan aktivitas antropogenik. Selain itu, penelitian ini juga menegaskan bahwa permasalahan PM_{2.5} di kawasan metropolitan tidak hanya berkaitan dengan besarnya konsentrasi polutan, tetapi juga dipengaruhi oleh kompleksitas sumber emisi, dinamika wilayah, dan keterbatasan sistem pemantauan. Oleh karena itu, diperlukan penguatan sistem pemantauan lebih merata dan konsisten, serta strategi pengendalian pencemaran udara yang terintegrasi dan berbasis bukti guna melindungi kesehatan masyarakat secara berkelanjutan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga artikel ini dapat diselesaikan dengan baik. Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta doa selama proses penelitian dan penyusunan artikel ini.

Ucapan terima kasih secara khusus disampaikan kepada orang tua dan keluarga yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, motivasi, dan dukungan tanpa henti sehingga penulis mampu menyelesaikan penelitian dan penulisan artikel ini. Penghargaan dan terima kasih yang tulus disampaikan kepada Dosen Pembimbing Lapangan di Direktorat Pengendalian Pencemaran dan Pengelolaan Mutu Udara, Kementerian Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Republik Indonesia, yang telah memberikan ilmu pengetahuan, arahan, dukungan, serta pengalaman berharga selama proses magang dan penyusunan artikel ini. Penulis menyadari bahwa artikel ini tidak akan terselesaikan tanpa kehadiran, bantuan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis berharap semoga segala kebaikan yang telah diberikan memperoleh balasan yang berlipat ganda dan menjadi amal baik yang memberikan manfaat bagi banyak orang.

Referensi

- Adkins, E. A., Yolton, K., Strawn, J. R., Lippert, F., Ryan, P. H., & Brunst, K. J. (2022). Fluoride exposure during early adolescence and its association with internalizing symptoms. *Environmental Research*, *204*, 112296. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112296>
- Burnett, R., Chen, H., Fann, N., Hubbell, B., Pope, C. A., III, Frostad, J., Lim, S. S., Kan, H., Walker, K. D., Thurston, G. D., Hayes, R. B., Lim, C. C., Turner, M. C., Jerrett, M., Krewski, D., Gapstur, S. M., Diver, W. R., Ostro, B., Goldberg, D., ... Spadaro, J. V. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *115*(38), 9592–9597. <https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>
- Chen, J., & Hoek, G. (2020). Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, *143*, 105974. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974>
- Chen, Y., Li, Y., Huang, C., Lin, C., Tien, C., Chen, W., Chen, C., & Lin, K. (2023). Predicting arm nonuse in individuals with good arm motor function after stroke rehabilitation: A machine learning study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *20*(5), 4123. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054123>
- Dominici, F., Peng, R. D., Bell, M. L., McDermott, A., Zeger, S. L., & Samet, J. M. (2006). Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. *JAMA*, *295*(10), 1127–1134. <https://doi.org/10.1001/jama.295.10.1127>
- Du, Y., Xu, X., Chu, M., Guo, Y., & Wang, J. (2016). Air particulate matter and cardiovascular disease: The epidemiological, biomedical and clinical evidence. *Journal of Thoracic Disease*, *8*(1), E8–E19. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2015.11.37>
- He, Y. S., Xu, Y. Q., Cao, F., Gao, Z. X., Ge, M., He, T., Zhang, P., Zhao, C. N., Wang, P., Xu, Z., & Pan, H. F. (2024). Association of long-term exposure to PM_{2.5} constituents and green space with arthritis and rheumatoid arthritis. *GeoHealth*, *8*(10), e2024GH001132. <https://doi.org/10.1029/2024GH001132>
- Komilova, N., Egamkulov, K., Hamroyev, M., Khalilova, K., & Zaynutdinova, D. (2023). The impact of urban air pollution. *Medical Perspectives*, *28*(3), 170–179. <https://doi.org/10.26641/2307-0404.2023.3.289221>
- Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., & Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, *525*(7569), 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- Madrigano, J., Mickley, L. J., Yan, D., Liu, T., Marlier, M. E., Bonilla, E., & Yulianti, N. (2024). Air pollution and blood pressure: Evidence from Indonesia. *GeoHealth*, *8*(8), e2024GH001014. <https://doi.org/10.1029/2024GH001014>

- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. (2021). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/161852/pp-no-22-tahun-2021>
- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 66 Tahun 2022 tentang Rencana Tata Ruang Kawasan Strategis Nasional Gerbang kertosusila. (2022). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/210110/perpres-no-66-tahun-2022>
- Santoso, M., Lestiani, D. D., Mukhtar, R., Hamonangan, E., Syafrul, H., Markwitz, A., & Hopke, P. K. (2011). Preliminary study of the sources of ambient air pollution in Serpong, Indonesia. *Atmospheric Pollution Research*, 2(2), 190–196. <https://doi.org/10.5094/APR.2011.024>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Tessum, C. W., Paoella, D. A., Chambliss, S. E., Apte, J. S., Hill, J. D., & Marshall, J. D. (2021). PM_{2.5} pollutants disproportionately and systemically affect people of color in the United States. *Science Advances*, 7(18), eabf4491. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf4491>
- 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. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- World Health Organization. (2024). Ambient (outdoor) air pollution. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)