



Analisis Korelasi Temporal Polutan Udara dan Kasus ISPA di Kabupaten Karawang Tahun 2023 Sebagai Dasar Perancangan Sensor IoT Kualitas Udara Lokal

Mahmudah Salwa Gianti*, Farah Aulia Kirana, Hanif Aidil Rachman, Muhammad Rifai Ayatulloh, Dewi Indriati Hadi Putri

Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia

Email: msg.salwa@upi.edu*, farahaul@upi.edu, hanifrahman3012@upi.edu, m.rifaiayat@upi.edu, dewiindri@upi.edu

Keywords:

temporal aggregatio; air pollution; Karawang; acute respiratory infection (ARI); Pearson correlation; IoT

Abstract

Karawang Regency, one of Indonesia's largest industrial areas, faces air quality challenges due to intensive industrial and transportation activities that may increase the risk of Acute Respiratory Infections (ARI). This study aims to identify the temporal relationship between air pollutant concentrations and ARI cases in Karawang Regency during 2023 and determine priority pollutant parameters for the design of a local Internet of Things (IoT)-based air quality monitoring system. This research employed a quantitative descriptive-correlational approach using secondary data and followed the Knowledge Discovery in Databases (KDD) framework. Air pollutant data were obtained from the Open-Meteo Air Quality API based on the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) model, while ARI case data were collected from the Karawang Health Office. Data processing involved preprocessing, temporal aggregation, lag feature engineering, and Pearson correlation analysis. The results revealed that sulfur dioxide (SO_2) with a one-month lag effect (lag-1) had the strongest correlation with ARI cases, with $r = 0.635$ and $p = 0.036$. Ozone and $PM_{2.5}$ also demonstrated positive associations under the lag-1 scenario. These findings indicate that the health impacts of air pollution exposure may occur with delayed temporal responses. This study concludes that SO_2 , ozone, and $PM_{2.5}$ should be prioritized as key parameters in developing local IoT-based air quality sensors to support real-time monitoring and mitigation of ARI risks in industrial areas of Karawang.

Kata Kunci:

agregasi temporal; polusi udara; Karawang; ISPA; korelasi Pearson; IoT

Abstrak

Kabupaten Karawang sebagai salah satu kawasan industri terbesar di Indonesia menghadapi permasalahan kualitas udara akibat tingginya aktivitas industri dan transportasi yang berpotensi meningkatkan risiko penyakit Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi hubungan temporal antara konsentrasi polutan udara dan kasus ISPA di Kabupaten Karawang tahun 2023 serta menentukan parameter polutan prioritas sebagai dasar perancangan sistem sensor Internet of Things (IoT) kualitas udara lokal. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-korelatif berbasis data sekunder dengan metode Knowledge Discovery in Databases (KDD). Data polutan diperoleh dari Open-Meteo Air Quality API berbasis model Copernicus

Atmosphere Monitoring Service (CAMS), sedangkan data kasus ISPA berasal dari Dinas Kesehatan Kabupaten Karawang. Analisis dilakukan melalui tahapan preprocessing, agregasi temporal, rekayasa fitur lag, dan uji korelasi Pearson. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sulfur dioksida (SO₂) dengan efek jeda satu bulan (lag-1) memiliki korelasi paling kuat terhadap kasus ISPA dengan nilai $r = 0,635$ dan $p = 0,036$. Selain itu, ozon dan PM_{2.5} juga menunjukkan hubungan positif pada skenario lag-1. Temuan ini menunjukkan bahwa respons kesehatan terhadap paparan polutan memiliki pola temporal tertentu. Penelitian menyimpulkan bahwa SO₂, ozon, dan PM_{2.5} merupakan parameter prioritas dalam pengembangan sensor IoT kualitas udara lokal untuk mendukung pemantauan dan mitigasi risiko ISPA di kawasan industri Karawang.

PENDAHULUAN

Kabupaten Karawang merupakan salah satu kawasan industri terbesar di Indonesia, dengan lebih dari 1.600 perusahaan manufaktur yang beroperasi di sembilan kawasan industri resmi (Putri & Susilawati, 2024). Tingginya konsentrasi aktivitas industri dan transportasi lintas Pantai Utara Jawa menghasilkan emisi multi-sumber, seperti SO₂, NO₂, CO, dan partikulat secara simultan, sehingga ISPA secara konsisten menjadi penyakit tertinggi yang ditangani Puskesmas setempat (Darmin & Mubin, 2024). Studi terbaru mengonfirmasi bahwa paparan jangka pendek terhadap polutan gas seperti SO₂ dan ozon meningkatkan risiko penyakit pernapasan melalui efek lag beberapa hari hingga satu bulan (Chen et al., 2024; Xu et al., 2025).

Tantangan utama dari perspektif Informatika bukan hanya pembuktian hubungan epidemiologis, melainkan rekayasa pipeline data untuk menjembatani dua sumber yang secara struktural berbeda: data polutan dari model atmosfer global Open-Meteo CAMS (resolusi ~11 km, per jam) dan data ISPA administrasi kesehatan dengan granularitas bulanan. Pendekatan data mining temporal mencakup temporal resampling, imputasi linier, dan rekayasa fitur lag, menghasilkan kontribusi teknis yang dapat direplikasi untuk konteks kota industri lain (Copernicus Atmosphere Monitoring Service [CAMS], 2024; Bhatt et al., 2025). Beberapa studi di Indonesia dan Asia telah melaporkan korelasi SO₂ terhadap ISPA, namun sebagian besar masih mengandalkan stasiun darat yang cakupan spasialnya terbatas (Anindita & Wahyuni, 2023; Maulana & Nugroho, 2026; Prasetyaningrum et al., 2024).

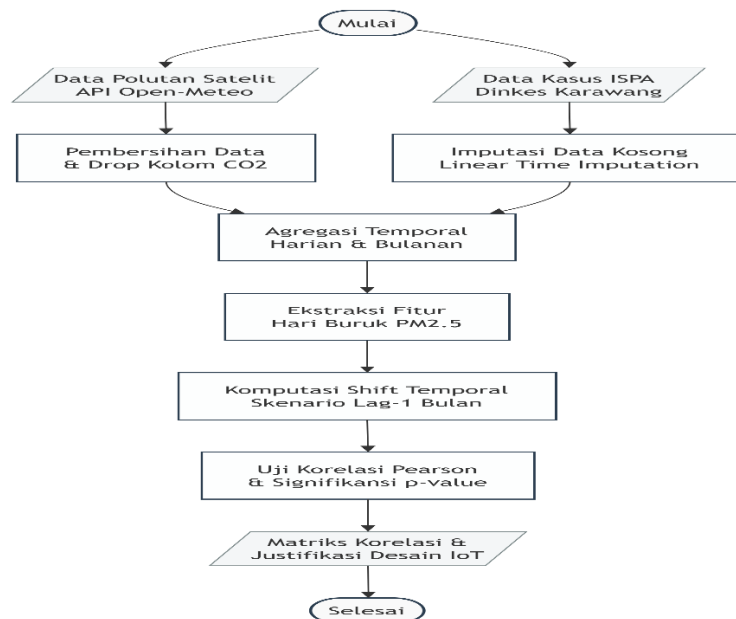
Di sisi rekayasa perangkat, sensor IoT berbiaya rendah kini mampu memantau PM_{2.5} dan ozon dengan akurasi memadai ($R^2 = 0,87\text{--}0,90$ setelah kalibrasi machine learning) dan dapat dioperasikan dalam jaringan multi-node secara real-time (Kumar et al., 2025; García et al., 2024). Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi polutan dengan korelasi temporal terkuat terhadap ISPA sebagai dasar seleksi kanal sensor prioritas pada rancangan node IoT lokal di Karawang (Dharmawan & Rofiki, 2025).

METODE PENELITIAN

Desain dan Alur Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-korelatif berbasis data sekunder, dirancang mengikuti prinsip Knowledge Discovery in Databases (KDD). Alur pipeline—dari akuisisi data, pembersihan, resampling temporal, rekayasa fitur lag, hingga

komputasi korelasi—ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Metodologi Analisis Hubungan Temporal antara Polusi Udara PM2.5 dan Kasus ISPA

Sumber Data

Data polutan diperoleh dari API Open-Meteo Air Quality historis berbasis model CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) Uni Eropa, koordinat 6,30°LS dan 107,30°BT (elevasi 16 m), periode 1 Januari – 1 Desember 2023, resolusi per jam. Tujuh variabel diekstraksi: PM₁₀, PM_{2.5}, debu, CO, NO₂, SO₂, dan ozon. CO₂ dibuang karena NaN signifikan. Validasi global CAMS menunjukkan korelasi harian $R = 0,6$ dengan kecenderungan overestimate terhadap stasiun referensi (Open-Meteo, 2023; Li et al., 2022).

Data ISPA bulanan diperoleh dari rekapitulasi Dinas Kesehatan Kabupaten Karawang tahun 2023 ($n = 12$). Lima bulan memiliki nilai terverifikasi dari dokumen resmi; tujuh bulan lainnya diestimasi secara linier mengacu pada total tahunan 166.000 kasus.

Pra-pemrosesan Data (Preprocessing)

Preprocessing dilaksanakan menggunakan Python (pandas 2.x). Tahapan inti: (1) pembacaan CSV Open-Meteo dengan `skiprows=3`; (2) agregasi harian via `resample('D').mean()`; (3) agregasi bulanan via `resample('ME').mean()`; dan (4) ekstraksi indikator hari buruk ($PM_{2.5} > 35,4 \mu g/m^3$, ambang EPA AQI > 100). Agregasi bulanan dipilih karena sesuai dengan granularitas data ISPA, lebih relevan secara epidemiologis, dan menstabilkan estimasi satelit yang berfluktuasi akibat tutupan awan (Copernicus Atmosphere Monitoring Service [CAMS], 2024).

```

# Temporal resampling
df_harian = df.resample('D').mean(numeric_only=True)
df_bulanan = df_harian.resample('ME').mean()
# Feature: hari tidak sehat (EPA threshold)
df_harian['hari_buruk'] = df_harian['pm25'].apply(
    lambda x: 1 if x > 35.4 else 0)
  
```

```
# Lag-1 feature engineering
for pol in ['pm10','pm25','so2','no2','co','ozone','dust']:
    df_bulanan[f'{pol}_lag1'] = df_bulanan[pol].shift(1)
# Pearson correlation (lag-1)
r, p_val = pearsonr(df_clean['Kasus_ISPA'], df_clean['so2_lag1'])
```

Kode 1. Implementasi temporal resampling, feature engineering lag-1, dan komputasi korelasi Pearson

Operasi shift(1) menggeser nilai polutan bulan ke- $t-1$ agar sejajar dengan ISPA bulan ke- t , sehingga efektif pada skenario lag-1 adalah 11 (bukan 12 karena baris pertama menjadi NaN).

Analisis Korelasi Pearson dengan Efek Temporal Lag

Analisis korelasi dilakukan menggunakan korelasi Pearson (r) antara setiap polutan dan data kasus ISPA bulanan. Koefisien korelasi Pearson dihitung menggunakan persamaan:

$$r_{xy} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{[\sum (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y_i - \bar{Y})^2]}} \quad (1)$$

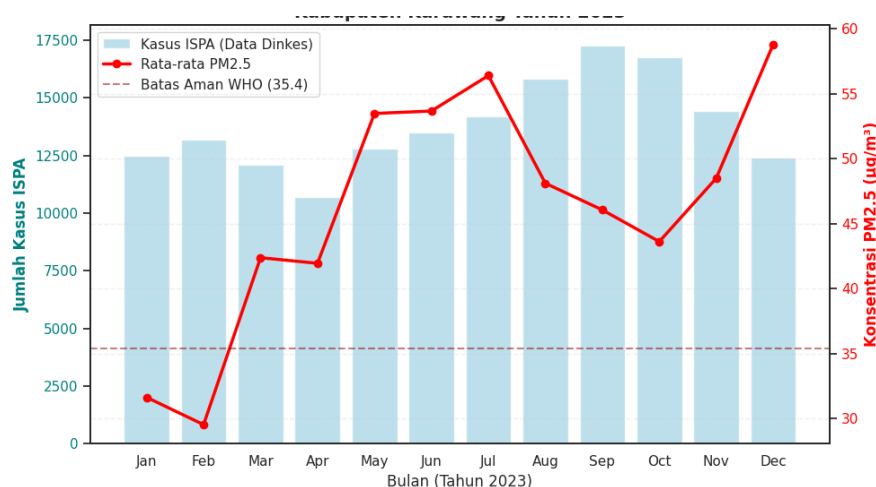
dengan X_i adalah konsentrasi polutan pada bulan ke- i , Y_i adalah jumlah kasus ISPA pada bulan ke- i , $\bar{X}$ dan $\bar{Y}$ masing-masing adalah rata-rata X dan Y , serta n adalah jumlah bulan pengamatan. Dua skenario analisis diterapkan: korelasi bulan sama (concurrent), yaitu korelasi langsung antara polutan bulan- t dan ISPA bulan- t ; dan korelasi lag-1 bulan (lagged), yaitu konsentrasi polutan digeser mundur satu bulan menggunakan fungsi shift(1) sehingga konsentrasi bulan $t-1$ dikorelasikan dengan ISPA bulan t , diformulasikan sebagai:

$$X_i^{-1} = X_{i-1}, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

Hipotesis *delayed biological response* menyatakan bahwa paparan SO_2 memerlukan jeda beberapa minggu untuk memicu respons inflamasi hingga terkonfirmasi sebagai kunjungan medis (Decadal Trends et al., 2024; Kim et al., 2022). Uji signifikansi dilakukan pada $\alpha = 0,05$ (dua ekor) menggunakan scipy.stats.pearsonr. $PM_{2.5}$ ditetapkan sebagai baseline mengacu pada panduan WHO 2021.

HASIL DAN PEMBAHASAN

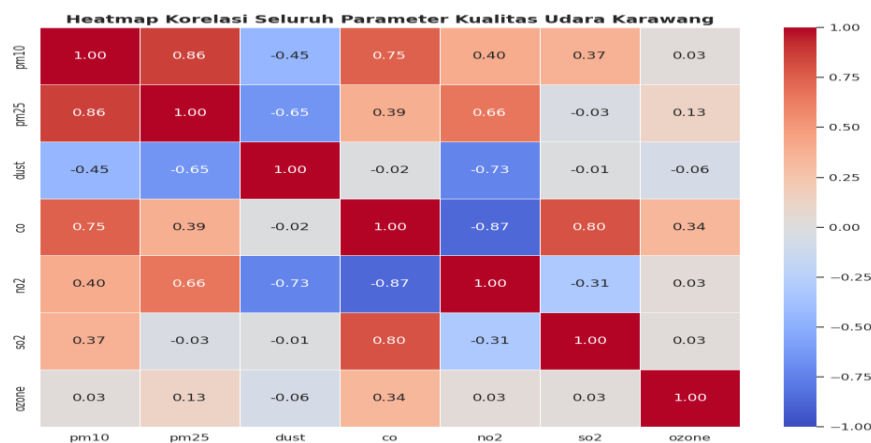
Statistik Deskriptif Polutan dan Kasus ISPA



Gambar 2. Tren Bulanan Kasus ISPA dan Konsentrasi PM2.5 di Kabupaten Karawang Tahun 2023

Agregasi bulanan data Open-Meteo menunjukkan rata-rata tahunan $\text{PM}_{2.5}$ sebesar $46,31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (max harian $92,98 \mu\text{g}/\text{m}^3$), melampaui ambang EPA ($35,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) selama 280 hari dalam setahun. Hal tersebut konsisten dengan laporan IQAir yang menempatkan Karawang sebagai kota terpolusi terburuk di Indonesia pada September 2023 (AQI = 178) (CNN Indonesia, 2023; CNBC Indonesia, 2023). Gambar 2 menampilkan dual-axis $\text{PM}_{2.5}$ vs ISPA bulanan. $\text{PM}_{2.5}$ terendah pada Januari–Februari ($\sim 29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, puncak musim hujan) lalu melonjak ke $\sim 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pada November–Desember, sementara puncak ISPA terjadi pada September (17.282 kasus) ketidakselarasan temporal ini merupakan bukti visual langsung atas mekanisme delayed biological response.

Heatmap korelasi antar polutan (Gambar 3) mengungkap korelasi negatif kuat CO–NO₂ ($r = -0,87$), konsisten dengan mekanisme fotokimia atmosfer, serta korelasi PM_{10} – $\text{PM}_{2.5}$ ($r = +0,86$) yang mengindikasikan kekolinearan sumber partikulat. Perlu dicatat bahwa SO₂–ozon sangat independen ($r = 0,03$), sehingga membenarkan penggunaan keduanya sebagai parameter yang saling melengkapi.



Gambar 3. Matriks Korelasi Antarparameter Kualitas Udara di Kabupaten Karawang

Data rekapitulasi Dinas Kesehatan Karawang tahun 2023 menunjukkan total estimasi 166.000 kasus ISPA dengan pola temporal yang tidak merata. Kasus terendah tercatat pada April (10.687 kasus) dan meningkat tajam menjelang akhir tahun dengan puncak pada September (17.282 kasus) dan Oktober (16.751 kasus), sebelum menurun pada November dan Desember.

Peringkat Korelasi Pearson Seluruh Polutan

Tabel 1 merangkum hasil analisis korelasi Pearson antara tujuh polutan (dua skenario: bulan sama dan lag-1 bulan) terhadap kasus ISPA bulanan Kabupaten Karawang tahun 2023, diurutkan dari tertinggi ke terendah.

Tabel 1. Peringkat Korelasi Pearson Seluruh Polutan terhadap Kasus ISPA Karawang 2023

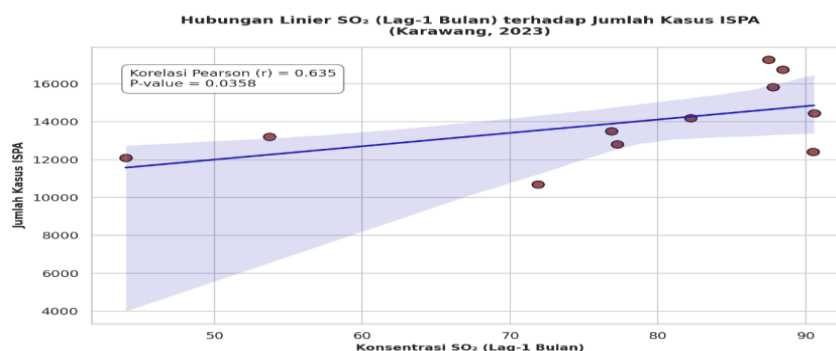
No.	Polutan & Skenario	r	Arah
1	SO ₂ (Lag-1 Bulan)	0,635*	↑ Positif
2	SO ₂ (Bulan Sama)	0,550	↑ Positif
3	Ozon (Lag-1 Bulan)	0,538	↑ Positif

No.	Polutan & Skenario	r	Arah
4	PM ₁₀ (Lag-1 Bulan)	0,474	↑ Positif
5	PM _{2.5} (Lag-1 Bulan)	0,446	↑ Positif
6	Ozon (Bulan Sama)	0,335	↑ Positif
7	PM ₁₀ (Bulan Sama)	0,148	↑ Positif
8	Dust (Bulan Sama)	0,143	↑ Positif
9	PM _{2.5} (Bulan Sama)	0,116	↑ Positif
10	Dust (Lag-1 Bulan)	0,031	↑ Positif
11	CO (Lag-1 Bulan)	-0,536	↓ Negatif
12	NO ₂ (Bulan Sama)	-0,636	↓ Negatif
13	NO ₂ (Lag-1 Bulan)	-0,647	↓ Negatif
14	CO (Bulan Sama)	-0,659	↓ Negatif

SO₂ Lag-1 Bulan sebagai Prediktor Terkuat ISPA

SO₂ lag-1 ($r=0,635$, $p=0,036$) menjadi prediktor terkuat, didukung Gambar 4 yang menunjukkan sebaran titik data mengikuti regresi linier positif. Karawang didominasi emisi SO₂ dari pembakaran industri berat (KIIC, MM2100, KIEC) yang bersifat point-source, sehingga sinyalnya lebih tajam dibanding partikulat yang tersebar luas. Mekanisme toksikologisnya: SO₂ memicu produksi mukus berlebih, bronkokonstriksi, dan penurunan aktivitas silia. Respons ini memerlukan jeda beberapa minggu sebelum terkonfirmasi sebagai kunjungan klinis (Decadal Trends et al., 2024; Kim et al., 2022). Temuan serupa dilaporkan di China dengan nilai RR tertinggi SO₂ pada lag 0–7 hari (Chen et al., 2024), dan studi Indonesia mengonfirmasi korelasi positif SO₂ dengan ISPA balita meski dengan r lebih lemah akibat perbedaan paparan outdoor-indoor (Prasetyaningrum et al., 2024).

Ozon lag-1 ($r=0,538$) menunjukkan pola konsisten sebagai oksidan kuat yang merusak epitel saluran napas melalui jalur fotokimia kumulatif (Kim et al., 2022). Peningkatan 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ paparan SO₂ dan ozon dilaporkan meningkatkan kadar C-reactive protein masing-masing 10,44% dan 1,05% (Xu et al., 2025).



Gambar 4. Hubungan linier SO₂ (lag-1 bulan) terhadap jumlah kasus ISPA Karawang tahun 2023

PM_{2.5}, Anomali NO₂/CO, dan Implikasi IoT

Korelasi PM_{2.5} lag-1 ($r=0,446$) hampir empat kali lebih tinggi daripada skenario bulan sama ($r=0,116$), mengonfirmasi efek kumulatif paparan partikulat melalui mekanisme aktivasi inflammasom NLRP3, gangguan clearance mukosilier, dan penurunan sekresi interferon- β (Singh et al., 2023; Hong et al., 2023). Sebaliknya, korelasi negatif kuat NO₂ ($r=-0,647$) dan CO ($r=-0,659$) merupakan artefak confounding musiman. Kedua polutan tersebut memuncak pada musim kemarau (Mei–Oktober) saat kasus ISPA justru lebih rendah (Anindita & Wahyuni, 2023; Maulana & Nugroho, 2026). Kondisi ini memerlukan kontrol variabel meteorologis pada analisis lanjutan.

Data satelit CAMS beresolusi ~ 11 km tidak mampu menangkap gradien konsentrasi antarzona industri–permukiman di Karawang. Studi menunjukkan jaringan sensor IoT multi-node mampu mencapai $R^2 = 0,74\text{--}0,87$ untuk PM_{2.5} setelah kalibrasi machine learning (Kumar et al., 2025; García et al., 2024), sementara sistem berbasis ESP32 dengan protokol MQTT ke AWS IoT Core telah divalidasi untuk pemantauan partikulat real-time (Aghorru & Koprav, 2023). Berdasarkan temuan ini, node IoT lokal Karawang direkomendasikan mengutamakan tiga kanal, yaitu SO₂, ozon, dan PM_{2.5}, dilengkapi dengan sensor meteorologis (suhu, kelembapan, arah angin) sebagai kovariat (Dewi & Kusuma, 2024).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa terdapat hubungan temporal antara paparan polutan udara dan peningkatan kasus Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA) di Kabupaten Karawang selama tahun 2023. Hasil analisis korelasi Pearson menunjukkan bahwa sulfur dioksida (SO₂) dengan efek jeda waktu satu bulan (lag-1) memiliki korelasi positif paling kuat terhadap kasus ISPA dengan nilai $r = 0,635$ dan $p = 0,036$, sehingga SO₂ menjadi indikator polutan yang paling berpotensi digunakan sebagai parameter prediksi peningkatan kasus ISPA. Selain itu, ozon dan partikulat PM_{2.5} juga menunjukkan pola hubungan positif dengan kasus ISPA, terutama pada skenario lag-1 yang mengindikasikan adanya respons biologis tertunda akibat paparan polutan. Temuan ini memperkuat bahwa analisis temporal berbasis data atmosfer dan kesehatan dapat digunakan sebagai pendekatan awal dalam memahami dampak kualitas udara terhadap kesehatan masyarakat. Berdasarkan hasil tersebut, rancangan sensor IoT kualitas udara lokal di Karawang direkomendasikan untuk memprioritaskan pemantauan SO₂, ozon, dan PM_{2.5} dengan dukungan parameter meteorologis sebagai variabel pendukung untuk menghasilkan sistem pemantauan yang lebih akurat dan kontekstual.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan model analisis yang lebih kompleks dengan melibatkan periode pengamatan yang lebih panjang dan jumlah data kesehatan yang lebih besar agar hubungan kausal antara polutan udara dan kejadian ISPA dapat dikaji secara lebih mendalam. Penggunaan data sensor IoT berbasis lapangan dengan resolusi spasial tinggi juga perlu dilakukan untuk mengatasi keterbatasan data model atmosfer CAMS yang memiliki resolusi spasial relatif luas dan belum sepenuhnya menggambarkan variasi kualitas udara pada tingkat lokal. Selain itu, penelitian lanjutan dapat mengintegrasikan metode kecerdasan buatan, seperti machine learning atau deep learning, dengan variabel meteorologi, pola aktivitas industri, serta karakteristik demografi masyarakat untuk membangun sistem prediksi risiko ISPA berbasis kualitas udara secara real-time. Pengembangan tersebut

diharapkan mampu mendukung pengambilan kebijakan lingkungan dan kesehatan masyarakat, khususnya dalam mitigasi dampak polusi udara di kawasan industri seperti Kabupaten Karawang.

DAFTAR PUSTAKA

- Aghorru, T., & Kopraw, M. (2023). Rancang bangun sistem pemantau kualitas dan polusi udara PM2.5 yang terintegrasi dengan platform IoT. *Jurnal Teknologia*, 14(3). <https://ojs.uniska-bjm.ac.id/index.php/JIT/article/viewFile/12029/5396>
- Anindita, F. S., & Wahyuni, L. (2023). Pengaruh tingkat polusi udara terhadap tingkat pengidap penyakit ISPA di lingkup masyarakat Kramat Jati. *Journal of Community Science*, 3(2). <https://doi.org/10.55816/jcs.v3i2.568>
- Bhatt, A., et al. (2025). *Hybrid Prophet-XGBoost forecasting for urban air quality with real-time CAMS Open-Meteo data*. Mendeley Data. <https://doi.org/10.17632/br5dyxm7c6.1>
- Chen, Z., et al. (2024). Correlation between respiratory infectious diseases, air pollution and meteorological factors with lag effects. *Frontiers in Public Health*, 12, e1460741. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1460741>
- CNN Indonesia. (2023, September). Karawang "digoyang" polusi, nomor 1 kota udara terburuk di RI pagi ini. <https://www.cnnindonesia.com/teknologi/20230901091704>
- CNBC Indonesia. (2023, September). Korban polusi, Sri Mulyani kena ISPA! Karawang kota terburuk. <https://www.cnbcindonesia.com/research/20230901072104>
- Copernicus Atmosphere Monitoring Service. (2024). CAMS Cy48R1 system upgrade validation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 9475–9514. <https://doi.org/10.5194/acp-24-9475-2024>
- Darmin, & Mubin, M. (2024). Hubungan kualitas udara ambien dengan jumlah kasus ISPA di Kota Kendari tahun 2020–2022. *Miracle Journal of Public Health*, 7(1), 1–12.
- Decadal Trends, D., et al. (2024). Decadal trends in ambient air pollutants and their associations with respiratory diseases. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(5), e11125922. <https://doi.org/10.3390/ijerph21050587>
- Dewi, R. A., & Kusuma, M. (2024). Bibliometric analysis of research trends on utilisation of low-cost sensors and IoT for PM2.5 air pollution monitoring (2014–2024). *Jurnal Manajemen dan Energi Lingkungan*. <https://jurnal.upnyk.ac.id/index.php/JMEL/article/download/14769/7237>
- Dharmawan, V. P., & Rofiki, A. (2025). Penerapan jaringan sensor nirkabel untuk sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT. *Karapan Network Journal: Journal Computer Technology and Mobile Ad Hoc Network*, 1(1).
- García, A., et al. (2024). Assessment of IoT low-cost sensor networks for long-term outdoor PM2.5 monitoring. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.002533>
- Hong, H., et al. (2023). Mechanism of interaction between hsa_circ_0002854 and MAPK1 protein in PM2.5-induced apoptosis of human bronchial epithelial cells. *Toxics*, 11, 906. <https://doi.org/10.3390/toxics11110906>
- Kim, J., et al. (2022). Air pollution-induced acute respiratory infection. *Juke Kedokteran Unila*, 8(1). <http://juke.kedokteran.unila.ac.id/index.php/JK/article/download/3014/2923>
- Kumar, R., et al. (2025). Investigating IoT-based low-cost sensor network for real-time hyper-local air quality monitoring and exposure assessment. *Atmospheric Pollution Research*, 16(9). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102351>
- Li, X., et al. (2022). Global validation and hybrid calibration of CAMS and MERRA-2 PM2.5 reanalysis products based on OpenAQ platform. *Atmospheric Environment*, 271, 118972. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.118972>

- Maulana, R., & Nugroho, A. (2026). Association between sulfur-dioxide and nitrogen-dioxide levels with acute respiratory infections during COVID-19 pandemic in Cilacap Regency. *Journal of Public Health Tropical Research*, 6(1). <https://doi.org/10.14710/jphtr.v6i1.31424>
- Open-Meteo. (2023). *Air Quality API – Historical Data (CAMS)*. <https://open-meteo.com/en/docs/air-quality-api>
- Prasetyaningrum, A. P., et al. (2024). SO₂ concentration and the occurrence of acute respiratory infections in children under five in Jakarta 2018–2021. *Kesmas: Jurnal Kesehatan Masyarakat Nasional*, 17(4). <https://doi.org/10.21109/kesmas.v17i4>
- Putri, J. M., & Susilawati, K. (2024). The role of the Karawang government in addressing air pollution. *Jurnal Advokasi*, 14(2). <https://doi.org/10.36407/advokasi.v14i2.5742>
- Singh, N. V., et al. (2023). The impact of PM_{2.5} air pollutant exposure on human respiratory health: A review. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 19(2), 1–15. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.19.2.1680>
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: PM_{2.5}, PM₁₀, ozone, NO₂, SO₂ and CO*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Xu, B., et al. (2025). Short-term effects of O₃ and SO₂ on C-reactive protein levels: Evidence from a population-based study. *Frontiers in Public Health*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1567206>