

Analisis Efek *Lag* Kualitas Udara terhadap Kasus COVID-19 Menggunakan Metode *Spearman Time-Lagged*

Jehzkiel Rangga Sere ^{1*}, Alz Danny Wowor ²

^{1,2} Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknologi Informasi, Teknik Informatika, Universitas Kristen Satya Wacana, Kota Salatiga, Provinsi Jawa Tengah, Indonesia.

Corresponding Email: anggasere@gmail.com ^{1*}

Histori Artikel:

Dikirim 6 April 2026; *Diterima dalam bentuk revisi* 15 Mei 2026; *Diterima* 30 Juli 2026; *Diterbitkan* 10 September 2026. Semua hak dilindungi oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) STMIK Indonesia Banda Aceh.

Abstrak

Penyebaran virus COVID-19 di daerah perkotaan semakin cepat karena kualitas udara yang menjadi sarana penyebaran patogen. Evaluasi epidemiologis umumnya tidak memperhitungkan masa inkubasi virus dan jeda waktu dampak polutan, sehingga mengakibatkan kesalahan dalam menilai waktu. Penelitian ini mengulas efek jangka panjang dari paparan polusi yang berdampak pada meningkatnya kasus COVID-19 di DKI Jakarta, dengan menerapkan metode Korelasi Spearman Time-Lagged. Studi ekologi deret waktu retrospektif dilakukan selama 1077 hari observasi, dari Juli 2020 hingga Juni 2023, yang menggabungkan data Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) dengan kasus harian yang telah di-normalisasi menggunakan metode Min-Max Scaling untuk menghilangkan bias akibat perbedaan skala, sebelum diuji dengan metode pergeseran waktu dari H-1 hingga H-14. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa semakin berkurangnya durasi paparan, semakin tinggi pula korelasinya, mencapai nilai tertinggi pada H-14 dengan koefisien sebesar 0,213. Temuan ini memperkuat durasi inkubasi virus (5-14 hari); menunjukkan bahwa penurunan daya tahan saluran pernapasan akibat polusi udara membutuhkan waktu dua minggu sebelum muncul sebagai peningkatan kasus secara klinis. Dari segi manajemen, model ini bekerja sebagai sistem peringatan awal. Kenaikan signifikan polusi udara hari ini memberi tanda kepada pihak berwenang untuk mempersiapkan kapasitas layanan rumah sakit selama dua minggu ke depan.

Kata Kunci: COVID-19; Kualitas Udara; Time-Lag; Korelasi Spearman; DKI Jakarta.

Abstract

The spread of the COVID-19 virus in urban areas is accelerating because air quality serves as a vector for the pathogen's transmission. Epidemiological evaluations generally do not account for the virus's incubation period and the time lag in the effects of pollutants, leading to errors in timing assessments. This study examines the long-term effects of pollution exposure on the rise in COVID-19 cases in the DKI Jakarta region, using the time-lagged Spearman correlation method. A retrospective time-series ecological study was conducted over 1,077 days of observation, from July 2020 to June 2023, combining Air Pollutant Standard Index (ISPU) data with daily case counts that had been normalized using the Min-Max Scaling method to eliminate biases caused by differences in scale, before being analyzed using time-lagged shifts ranging from H-1 to H-14. The results showed that as the duration of exposure decreased, the correlation increased, reaching its highest value at H-14 with a coefficient of 0.213. This finding supports the virus's incubation period (5–14 days); it indicates that the decline in respiratory tract resilience caused by air pollution takes two weeks to manifest as a clinical increase in cases. From a management perspective, this model functions as an early warning system. A significant increase in air pollution today signals to authorities to prepare hospital capacity for the next two weeks.

Keyword: COVID-19; Air Quality; Time-Lag; Spearman Correlation; DKI Jakarta.

1. Pendahuluan

Penyebaran penyakit *Coronavirus Disease 2019 (COVID-19)* di area perkotaan yang ramai penduduk bukan hanya suatu isu bagi bidang virologi, melainkan juga merupakan suatu situasi lingkungan yang sangat dipengaruhi oleh keadaan cuaca. Virus *SARS-CoV-2* tersebar melalui udara, menjadikan udara sebagai saluran utama untuk penyebarannya. Fenomena yang umumnya terlihat adalah adanya hubungan ganda antara kualitas udara dan tingkat kematian yang diakibatkan oleh pandemi. Bahan pencemar berperan dalam menjaga stabilitas virus secara fisik di lingkungan terbuka, sehingga memperpanjang waktu paparan virus kepada individu (Santurtún *et al.*, 2022). Di sisi lain, pendedahan terus-menerus terhadap polusi merusak sistem pertahanan tubuh pada saluran pernapasan manusia, menghasilkan kelompok yang sangat rentan terhadap penyakit (Maleki *et al.*, 2021). Realitas di lapangan menunjukkan bahwa meskipun terdapat kebijakan yang ketat, risiko lingkungan tetap tinggi. Berdasarkan hasil pengukuran yang akurat, selama masa pembatasan kegiatan masyarakat di Jakarta, tingkat partikel seperti PM_{10} masih terbukti melampaui batas aman yang diatur oleh WHO, menunjukkan bahwa pencemaran udara tetap menjadi ancaman yang berkelanjutan meskipun ada batasan terhadap mobilitas masyarakat (Anggraeni *et al.*, 2021). Selain itu, kondisi cuaca di daerah perkotaan dan akumulasi polutan tertentu seperti $PM_{2.5}$ dan Karbon Monoksida (CO) masih menjadi penyebab utama pencemaran udara yang dapat memperburuk kesehatan masyarakat. Masalah utama yang mengganggu akurasi kebijakan publik selama pandemi adalah kecenderungan untuk menganalisis data hanya dalam rentang waktu tertentu. Sebagian besar evaluasi epidemiologis membuat kesalahan logis dengan berasumsi bahwa paparan polusi pada hari ini akan secara langsung meningkatkan jumlah kasus pada hari yang sama. Dari perspektif medis, virus memiliki periode inkubasi rata-rata 5–6 hari dengan batas hingga 14 hari (World Health Organization, 2023), dan kerusakan yang ditimbulkan oleh polutan memerlukan waktu sebelum menimbulkan sindrom pernapasan akut yang bisa mengancam jiwa atau memperburuk gejala yang ada. Jika jeda waktu ini diabaikan, data dapat mengindikasikan "penurunan statistik" atau ketidaksesuaian dalam lonjakan jumlah kasus. Variasi kualitas udara di suatu kota sangat fluktuatif setiap harinya dan sangat bergantung pada mobilitas masyarakat, yang berarti dampaknya terhadap kesehatan tidak terasa dengan langsung, melainkan tertunda. Ketidakmampuan untuk mengenali variabel cuaca dan tingkat polusi ketika mempertimbangkan lama penyebaran infeksi menyebabkan kesimpulan statistik yang operasionalnya kurang tepat.

Tanpa mempertimbangkan dampaknya di masa mendatang, pemerintah dan sistem kesehatan beroperasi dengan cara yang kurang efektif mereaksi secara lambat terhadap lonjakan kasus atau menggunakan sumber daya medis secara tidak efisien, alih-alih melakukan respons yang lebih tepat dan tepat waktu sejak langkah awal. Untuk mengatasi masalah bias waktu, solusi teknis yang digunakan harus mampu beradaptasi dengan data yang tidak terdistribusi secara normal dan dapat menyesuaikan dengan perubahan waktu yang terjadi dengan cepat. Pendekatan yang diterapkan adalah menggunakan korelasi *Spearman* dengan jeda waktu. Pilihan pada Korelasi Ranking *Spearman* didasarkan pada karakter non-parametriknya, sehingga ia bisa mengukur keterkaitan monoton antara kualitas udara dan jumlah infeksi *COVID-19* tanpa memaksa data yang kotor untuk memenuhi syarat distribusi normal. Penerapan algoritma Jeda Waktu pada metode ini khususnya memindahkan matriks variabel independen (polutan harian) dengan kisaran waktu inkubasi biologis (misalnya *Lag-1* hingga *Lag-14*) terhadap variabel dependen (jumlah kasus terkonfirmasi dan angka kematian). Algoritma ini beroperasi dengan cara yang realistis, membandingkan waktu ketika populasi terpapar zat berbahaya di udara dengan waktu ketika hasil uji laboratorium menunjukkan adanya infeksi, sehingga menggambarkan kemungkinan nyata dari hubungan sebab dan akibat. Dalam disiplin statistika dan analisis prediktif, pemodelan deret waktu telah lama dimanfaatkan untuk mengamati perubahan variabel seiring berjalannya waktu. Umumnya, penelitian mengenai pandemi di Indonesia mulai mengenali pentingnya mengintegrasikan variabel eksternal, contohnya seperti membuktikan bahwa pergeseran dalam fluktuasi ekonomi atau tingkat mobilitas memberikan efek nyata yang dapat dianalisis melalui pendekatan waktu seperti *ARIMAX* (Isnaini *et al.*, 2023), maupun model prediksi

hubungan polusi udara terhadap kasus COVID-19 di wilayah Indonesia (Hastiaty *et al.*, 2024). Namun, dalam konteks kesehatan lingkungan, pemodelan cenderung tidak akurat karena tidak dengan jelas mengawasi durasi inkubasi patogen sehubungan dengan perubahan kualitas udara. Penurunan drastis emisi polusi dalam waktu singkat, misalnya ketika diterapkan kebijakan pembatasan lokal atau saat perayaan besar, menyebabkan perubahan yang mendadak pada kualitas udara. Efek negatifnya bagi paru-paru pasien yang terinfeksi COVID-19 bisa dirasakan secara tiba-tiba setelah beberapa hari atau minggu kemudian (Waryatno *et al.*, 2022). Perubahan distribusi polutan selama periode pengendalian pandemi juga terbukti terjadi di berbagai kota besar Indonesia (Suhardono *et al.*, 2023). Kekurangan adanya jembatan analitik yang dapat menggabungkan teknik deret waktu yang fleksibel dengan ketahanan terhadap data lingkungan harian yang tidak biasa, membuat model prediksi yang umum gagal dalam mendeteksi pola tersembunyi, yaitu saat polusi mencapai puncak dan kapan ruang ICU di rumah sakit dipenuhi. Kegagalan untuk menyelaraskan waktu kerusakan lingkungan dengan waktu munculnya virus mengakibatkan keputusan strategis yang salah di lapangan. Maka dari itu, penerapan metode *Spearman Time-Lagged* secara langsung memenuhi kebutuhan akan ukuran yang akurat dan sesuai dengan kondisi nyata. Dengan memanfaatkan uji statistik non-parametrik yang dikombinasikan dengan analisis penggeseran waktu, pendekatan ini secara mendalam mengkaji kapan tepatnya polutan udara berfungsi sebagai pemicu kematian akibat COVID-19. Solusi ini tidak hanya memperjelas hubungan antara berbagai hal, tetapi juga berfungsi sebagai sistem peringatan dini yang memanfaatkan logika cerdas dan pengalaman nyata. Jika pada hari ini tingkat polusi mencapai ambang yang mengkhawatirkan, metode ini dapat memprediksi kapan gelombang kasus berbahaya akan muncul yang dapat mengganggu sistem layanan kesehatan. Pendekatan korelasi berbasis jeda waktu serupa telah terbukti efektif mengidentifikasi efek tertunda paparan partikulat terhadap mortalitas COVID-19 di Wuhan (Shao *et al.*, 2022). Realitas penyebaran penyakit COVID-19 dari segi epidemiologi sangat terkait dengan keadaan kualitas udara di wilayah perkotaan. Lingkungan perkotaan bukanlah suatu area yang kosong, melainkan sebuah ekosistem yang selalu berubah dan mendukung eksistensi serta penyebaran patogen yang ada di atmosfer. Oleh karena itu, dasar penelitian pertama secara langsung diarahkan pada penelitian observasional yang mengevaluasi anomali polusi udara sebagai variabel yang merespons perubahan dalam kebijakan transportasi umum. Tinjauan ini menekankan fakta yang tampak di lapangan, yaitu bahwa parameter lingkungan bertindak sebagai pemicu utama krisis kesehatan, dan tingkatannya bervariasi tergantung pada aktivitas manusia yang dilakukan. Pengendalian kualitas udara lingkungan sendiri telah lama ditekankan sebagai upaya pencegahan transmisi SARS-CoV-2 (Pakasi & Pakasi, 2020), dan pemantauan kualitas udara ambien di lingkungan perkotaan selama masa pandemi menunjukkan fluktuasi yang signifikan (Zahra *et al.*, 2022).

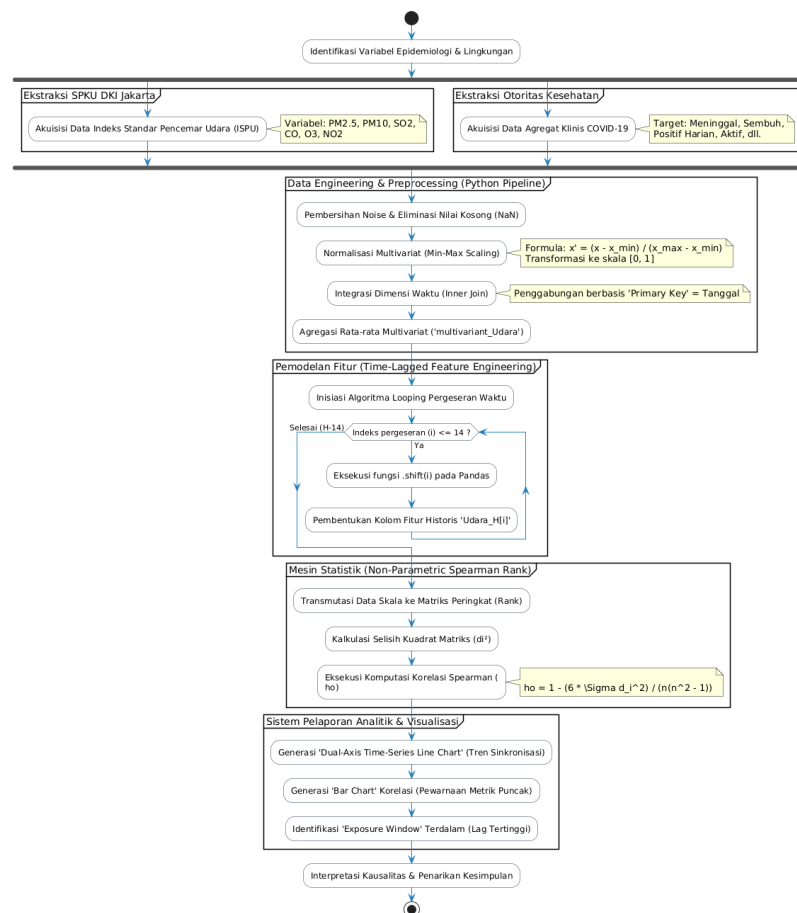
Penelitian yang dilakukan oleh Anggraeni dan rekan-rekannya pada tahun 2021 mengenai analisis kadar PM_{10} di stasiun observasi BMKG Kemayoran selama periode pandemi COVID-19 menunjukkan adanya bukti kuat bahwa variasi tingkat polutan berkaitan langsung dengan kebijakan pembatasan yang diterapkan oleh pemerintah. Kajian ini mengevaluasi pola kualitas udara selama masa Pembatasan Sosial Berskala Besar (PSBB) dan transisi ke fase berikutnya, menunjukkan bahwa ketika aktivitas masyarakat dan penggunaan transportasi mulai diizinkan kembali, konsentrasi partikel di udara meningkat drastis hingga mencapai rata-rata $99 \mu g/m^3$. Peningkatan ini menegaskan bahwa kondisi udara di lingkungan kita semakin memburuk secara berkelanjutan dan seringkali melebihi ambang batas yang ditetapkan oleh *World Health Organization (WHO)*. Temuan tersebut mengonfirmasi bahwa pembatasan sosial berpengaruh langsung dan terukur pada peningkatan emisi, sehingga polusi udara menjadi ancaman yang berkelanjutan di daerah perkotaan yang padat. Kelemahan utama dalam studi ini adalah pendekatannya yang bersifat deskriptif-komparatif; penelitian itu hanya sebatas mencatat bahwa "kualitas udara memburuk akibat peningkatan mobilitas" tanpa adanya pengujian korelasi statistik yang mengevaluasi efek langsung dari polutan udara terhadap kemungkinan penularan atau kematian yang disebabkan oleh virus tersebut. Studi ini menerapkan pendekatan analitik untuk merubah data yang hanya menunjukkan situasi menjadi model yang mengevaluasi dampak penyebaran polutan terhadap tingkat infeksi virus COVID-19.

Tinjauan juga diarahkan pada mekanisme biologis yang menjelaskan bagaimana partikulat meningkatkan kerentanan terhadap infeksi saluran pernapasan. Galsuren *et al.* (2025) menunjukkan bahwa paparan partikulat memicu produksi *reactive oxygen species* (ROS) yang menimbulkan stres oksidatif pada epitel saluran napas, mengaktifkan faktor transkripsi NF- κ B dan AP-1, serta mendorong pelepasan sitokin pro-inflamasi seperti IL-6, IL-8, dan TNF- α ; kondisi ini merusak integritas sawar epitel alveolus dan melemahkan fungsi makrofag sebagai lini pertahanan pertama paru-paru. Selain itu, paparan partikulat kronis terbukti meningkatkan ekspresi reseptor ACE-2 yang menjadi pintu masuk SARS-CoV-2 ke dalam sel paru (Shao *et al.*, 2022). Rangkaian mekanisme ini menjelaskan secara biologis mengapa dampak paparan polutan tidak muncul secara instan, melainkan terakumulasi selama beberapa hari sebelum bermanifestasi sebagai kasus klinis, sesuai dengan premis jeda waktu yang diuji. Setelah menentukan prioritas pada variabel lingkungan, langkah berikutnya dalam tinjauan literatur adalah memeriksa keakuratan dan keandalan instrumen statistik yang akan digunakan. Dibutuhkan metode perhitungan yang kuat dan tahan terhadap gangguan untuk memproses data mentah tentang lingkungan dan kesehatan, karena data tersebut secara alami mengandung nilai-nilai ekstrem dan bukan berbentuk distribusi normal. Penelitian yang ditulis oleh Nurhalijah *et al.* (2024) dengan judul "Analisis Korelasi Spearman Untuk Mengetahui Hubungan Antara Penggunaan Media Sosial Dan Tingkat Produktivitas Akademis" menunjukkan bahwa metode uji korelasi Spearman Rank merupakan alat analisis yang sangat handal dalam mengidentifikasi kekuatan hubungan antar variabel yang berhubungan. Studi ini mengungkapkan kemampuan algoritma Spearman dalam menangani data yang berjenis ordinal atau interval tanpa harus bergantung pada distribusi tertentu. Berbeda dengan uji parametrik yang memerlukan data untuk memiliki distribusi normal, Spearman beroperasi dengan mengonversi nilai-nilai tersebut menjadi rangking.

Sifat ini menjadikannya sangat kuat dan efisien dalam memodelkan data mentah yang tidak teratur tanpa memerlukan modifikasi terhadap keutuhan data asli, sebuah kondisi yang sangat krusial saat mengatasi data deret waktu tentang polusi udara dan situasi epidemiologi yang sangat fluktuatif. Meskipun algoritma Spearman menunjukkan kekuatan yang signifikan secara matematis dalam menganalisis hubungan antara data non-parametrik, struktur model yang digunakan dalam penelitian ini bersifat tetap karena mengaitkan variabel independen dan dependen pada saat yang bersamaan, yang merupakan kesalahan logis bila diterapkan dalam penelitian epidemiologi infeksius yang memiliki fase inkubasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi kekurangan tersebut dengan memadukan kehandalan Spearman ke dalam matriks Time-Lagged (pergeseran waktu) agar dapat secara tepat merekam efek tertunda dari paparan polutan sampai timbulnya gejala klinis. Penelitian yang dilakukan oleh Sari (2023) telah mengkonfirmasi adanya keterkaitan langsung antara variasi kualitas udara, tingkat penyebaran virus COVID-19, dan konsekuensi yang terjadi setelah periode tertentu. Dalam analisisnya mengenai hubungan antara polutan udara yang diukur dan kasus harian COVID-19 di Kota Padang, faktor waktu dimanfaatkan sebagai metode utama untuk mengatasi potensi bias yang berkaitan dengan waktu. Studi ini menerapkan uji korelasi Spearman dan Pearson secara spesifik, dengan menerapkan periode penundaan waktu yang sesuai dengan siklus inkubasi virus, yakni Lag 0, Lag-7, Lag-14, dan Lag-21 hari. Hasil analisis menunjukkan bahwa eksposur terhadap polutan tertentu seperti PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, CO, O₃, dan NO₂ memiliki tingkat keterkaitan yang signifikan bervariasi tergantung pada jangka waktu yang dipertimbangkan. Data statistik ini menyoroti bahwa unsur berbahaya di udara berkontribusi sebagai pemicu penyakit dalam sistem pernapasan. Kenaikan jumlah kasus positif tidak terdeteksi langsung pada hari yang sama dengan paparan awal, melainkan baru tercatat sebagai data medis beberapa hari hingga beberapa minggu setelah paparan pertama. Walaupun pendekatan penelitian ini memiliki struktur yang tepat dalam memanfaatkan waktu jeda untuk mengurangi bias temporal, lokasi operasionalnya memiliki keterbatasan pada skala karena hanya diterapkan di kota-kota dengan demografi, kepadatan industri, dan kompleksitas mobilitas yang cenderung rendah. Penelitian ini akan mengambil kerangka algoritma tersebut dan mengaplikasikannya secara lebih luas pada kumpulan data dari pusat kota metropolitan yang jauh lebih besar dan kompleks, di mana variabel kadar polutan serta tingkat infeksi merefleksikan secara nyata kondisi krisis di lingkungan perkotaan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini mengadopsi metode kuantitatif dengan struktur studi ekologi deret waktu yang bersifat retrospektif untuk mengevaluasi hubungan antara kualitas udara luar dan perkembangan kasus virus *COVID-19* di Provinsi DKI Jakarta. Pilihan desain ini diambil karena mampu menganalisis data populasi yang terintegrasi, sehingga dapat menemukan pola penyebaran penyakit yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan dalam rentang waktu tertentu. Pemilihan desain deret waktu ini sangat penting untuk mengidentifikasi keanehan dalam transmisi patogen yang dibawa oleh udara yang dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan kualitas udara di lingkungan perkotaan selama periode waktu tertentu. Penelitian ini dilaksanakan dengan cara yang sistematis, dimulai dari identifikasi masalah, pengumpulan data sekunder, persiapan data sebelum dianalisis, penggabungan berbagai dataset, pelaksanaan analisis fitur dengan metode pergeseran waktu, sampai pada analisis hubungan menggunakan metode statistik non-parametrik. Semua tahap prosedural tersebut diilustrasikan ke dalam matriks komputasi yang ditampilkan secara visual pada struktur alur kerja penelitian dalam Gambar 1.



Gambar 1. Alur Penelitian

Pada diagram alur yang terdapat pada Gambar 1, tahap awal dimulai dengan pengumpulan data sekunder yang meliputi dua variabel utama. Variabel yang pertama adalah kualitas udara yang diperoleh dari Stasiun Pemantauan Kualitas Udara (SPKU) DKI Jakarta, yang mencakup lima stasiun pemantauan, yaitu SPKU Lubang Buaya (Jakarta Timur), SPKU Kelapa Gading (Jakarta Utara), SPKU Kebon Jeruk (Jakarta Barat), SPKU Jagakarsa (Jakarta Selatan), dan SPKU Bundaran HI

(Jakarta Pusat), sedangkan variabel yang kedua adalah perkembangan harian kasus *COVID-19* yang diambil dari repositori resmi pemerintah. Dataset mengenai kualitas udara ini terdiri dari enam parameter polutan utama, yaitu $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , CO , O_3 , dan NO_2 seperti yang dijelaskan pada tabel 1. Penggunaan kelima stasiun tersebut memastikan data kualitas udara merepresentasikan seluruh wilayah administrasi DKI Jakarta secara merata, bukan hanya satu titik pengamatan tunggal.

Tabel 1. Variabel dan Atribut Kualitas Udara Ambien

No	Variabel	Atribut
1	<i>Tanggal</i>	Primary key untuk sinkronisasi linimasa time-series
2	$PM_{2.5}$	Konsentrasi partikulat polusi mikro (< 2.5 mikron)
3	PM_{10}	Konsentrasi partikulat polusi kasar (< 10 mikron)
4	SO_2	Indeks konsentrasi gas Sulfur Dioksida
5	CO	Indeks konsentrasi gas Karbon Monoksida
6	O_3	Indeks konsentrasi gas Ozon ambien/permukaan
7	NO_2	Indeks konsentrasi gas Nitrogen Dioksida

Kumpulan data epidemiologis *COVID-19* mencakup total kasus positif yang telah dikonfirmasi serta jumlah kematian harian yang diambil dari sumber pemerintah, yang berfungsi sebagai tanda dari dampak kesehatan yang terlihat. Informasi tentang variabel operasional yang diterapkan dalam area epidemiologi ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Variabel dan Atribut Epidemiologi COVID-19

No	Variabel	Atribut
1	Tanggal	<i>Primary key</i> untuk sinkronisasi linimasa time-series
2	Meninggal	Jumlah fatalitas harian terkonfirmasi COVID-19
3	Sembuh	Jumlah pasien dengan status pemulihan klinis harian
4	Self Isolation	Jumlah pasien aktif dalam isolasi mandiri
5	Masih Perawatan	Jumlah pasien aktif dalam penanganan fasilitas kesehatan
6	Total Pasien	Akumulasi keseluruhan kasus infeksi aktif
7	Positif Harian	Jumlah konfirmasi infeksi baru per hari
8	Positif Aktif	Akumulasi konfirmasi infeksi berjalan
9	Sembuh Harian	Rasio dan tingkat pemulihan populasi per hari
10	Tanpa Gejala	Kasus terkonfirmasi asimtomatik
11	Bergejala	Kasus terkonfirmasi simptomatik

Langkah krusial selanjutnya dalam tahap Rekayasa Data adalah menyiapkan data dengan menghilangkan gangguan dan mengatur ukuran datanya menggunakan metode *Min-Max Scaling*. Metode ini diterapkan untuk menyamakan skala pengukuran di antara variabel yang sangat berbeda, mengingat bahwa parameter polusi memiliki satuan konsentrasi yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan skala jumlah populasi dalam data kesehatan. Normalisasi dilakukan dengan cara memodifikasi nilai data ke dalam batasan 0 hingga 1 menggunakan rumus:

$$x' = \frac{(x - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})}$$

Sehingga pengaruh nilai besar dapat dikurangi secara efektif. Penerapan normalisasi absolut ke dalam skala [0,1] dalam pemodelan berbasis machine learning serta statistika deret waktu terbukti dapat meningkatkan kestabilan komputasi dan mencegah adanya bobot semu pada nilai makro (Suhardono *et al.*, 2023). Setelah data diatur ulang, kedua data set digabungkan dengan metode inner join berdasarkan variabel waktu yaitu tanggal, sehingga terbentuk satu struktur data yang memiliki

banyak variabel dan urutan waktu yang sesuai. Pada tahap utama penelitian, dilakukan proses perekayasa fitur menggunakan metode *Time-Lagged Shifting*, yaitu pergeseran waktu jeda. Karena dampak kualitas udara terhadap kesehatan tidak terjadi secara langsung (efek akut), tetapi membutuhkan waktu paparan yang berlangsung seiring dengan masa inkubasi virus dan jeda waktu pelaporan kesehatan, maka variabel kualitas udara digeser mundur mulai dari $H-1$ hingga $H-14$. Berdasarkan prinsip dasar dalam desain program, fitur *Time-Lag* dihasilkan melalui pengulangan perintah `.shift(i)` dalam Python untuk menampilkan kolom data historis (Udara_H1 s.d Udara_H14). Pergeseran ini penting agar kita bisa memahami hubungan sebab-akibat yang tertunda antara hari polutan masuk ke atmosfer dengan hari kasus klinis tercatat. Untuk memeriksa hubungan antar variabel, metode yang digunakan adalah korelasi peringkat *Spearman*. Metode ini dipilih secara strategis karena data lingkungan dan epidemiologi biasanya tidak mengikuti pola distribusi normal dan sering kali memiliki nilai-nilai ekstrem yang tidak biasa. Berbeda dengan korelasi *Pearson* yang mengasumsikan data memiliki distribusi normal dan hubungan linear, metode *Spearman* menggunakan peringkat sebagai dasar dalam melakukan perhitungan. Hal ini membuat metode *Spearman* lebih efektif dalam menghadapi hubungan monotonik pada data deret waktu yang rumit dan kompleks. Koefisien korelasi dihitung dengan rumus:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2-1)}$$

Di mana variabel kualitas udara dan COVID-19 diberi peringkat agar dapat mengetahui derajat kekuatan serta arah hubungan antara keduanya. Dengan menggunakan modul `.corr(method='spearman')` di *Python*, seluruh proses perhitungan dilakukan secara sistematis, mulai dari tahap pengolahan data hingga pembuatan visualisasi matriks korelasi, sehingga hasil yang diperoleh lebih akurat dan proses pengidentifikasian jendela paparan yang paling berpengaruh terhadap perkembangan pandemi *COVID-19* menjadi lebih efektif.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

3.1.1 Deskripsi Data Awal dan Integrasi Dataset

Penelitian ini mengumpulkan dua sumber data sekunder berskala makro secara retrospektif, yaitu metrik kualitas udara harian dari Stasiun Pemantauan Kualitas Udara (SPKU) DKI Jakarta serta data epidemiologi COVID-19 yang diakumulasi oleh otoritas kesehatan resmi. Pemilihan DKI Jakarta didasarkan pada realitas operasional bahwa wilayah ini merupakan pusat penyebaran penyakit dengan tingkat emisi gas buang dan partikulat dari industri yang sangat bervariasi. Hal ini terbukti secara empiris memperparah terjadinya infeksi saluran pernapasan di area perkotaan (Ahmad *et al.*, 2019). Untuk memastikan sinkronisasi sempurna antara kedua metrik yang memiliki dimensi berbeda, dilakukan proses penggabungan data dengan menggunakan metode *inner join* berdasarkan atribut '*Tanggal*'. Rentang pengamatan Juli 2020 hingga Juni 2023 secara kalender mencakup 1.095 hari. Pembersihan data dilakukan dalam dua tahap yang terdokumentasi: (1) eksekusi *inner join* menghapus hari-hari yang tidak memiliki pasangan pada salah satu sumber data (data hilang); dan (2) deteksi data anomali menggunakan metode *Interquartile Range (IQR)*, di mana observasi dengan nilai di luar batas $Q1 - 1,5 \times IQR$ dan $Q3 + 1,5 \times IQR$ pada variabel polutan maupun kasus harian dikeluarkan dari analisis. Kedua tahap ini menyisakan 1077 hari observasi yang berpasangan, kuat, dan siap untuk dianalisis. Fusi ini menghasilkan matriks data yang lengkap, yang menggabungkan parameter polutan atmosfer dengan respons klinis dari populasi, seperti yang terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Sampel Data Terintegrasi Kualitas Udara dan COVID-19

Tanggal	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	CO	O_3	NO_2	Positif Harian	Sembuh	Meninggal
2020-07-01	75	55	23	15	40	12	204	150	5
2020-07-02	80	58	21	18	42	14	215	165	4
2020-07-03	85	60	25	16	38	13	240	170	6
2020-07-04	70	52	20	14	35	10	210	180	3

3.1.2 Preprocessing dan Normalisasi Data Min-Max

Kekurangan terbesar dalam pemodelan multivariat adalah mengabaikan perbedaan ukuran antar variabel. Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) menggunakan parameter partikulat mikroskopis yang diukur dalam satuan puluhan mikrogram, sedangkan lonjakan kasus *COVID-19* terjadi dalam jumlah ribuan hingga puluhan ribu orang. Tanpa pembersihan data yang cukup, variabel klinis yang memiliki nilai besar akan mengendalikan algoritma dan menghasilkan korelasi yang tidak benar. Sebagai solusi teknis, metode *Min-Max Scaling* digunakan untuk memastikan semua nilai ekstrem dalam distribusi masuk ke dalam skala proporsional absolut yang berada antara 0 hingga 1. Transformasi ini dioperasikan dengan rumus matematis $x' = (x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min})$, yang secara efektif mengurangi bias volume tanpa mengganggu integritas tren temporal asli dari data historis. Hasil transformasi numerik ini ditampilkan dalam perbandingan Tabel 4.

Tabel 4. Normalisasi Data Positif Harian COVID-19

Indeks	Data Asli (Positif Harian)	Data Normalisasi (0 – 1)
0	204	0.0125
1	215	0.0132
2	240	0.0148
3	210	0.0129
...	...	...
1076	145	0.0089

3.1.3 Alur Logika Pemrograman dan Rekayasa Fitur Pergeseran Waktu (*Lag*)

Mesin analitik dalam penelitian ini dibuat agar tidak membaca data secara bersamaan, namun menggunakan teknik rekayasa fitur yang didasarkan pada pergeseran waktu. Seluruh indeks polutan yang sudah dinormalisasi digabungkan menjadi satu indikator komposit bernama 'multivariat_Udara', yang menggambarkan penumpukan racun di atmosfer sehari-hari. Berdasarkan logika medis bahwa paparan terhadap zat beracun tidak menyebabkan kematian atau infeksi akut pada hari yang sama, variabel kualitas udara ini digeser secara regresif (*time-lag shifting*) mulai dari H-1 hingga H-14. Seluruh desain proses pengolahan data, mulai dari normalisasi matriks, penggabungan dataset, hingga perhitungan korelasi, disajikan dalam representasi logika algoritma (pseudo-code) berikut untuk menunjukkan ketahanan model dalam menghitung dampak tunda (*time-lag effect*).

Tabel 5. Alur Logika Pemrograman dan Rekayasa Fitur Pergeseran Waktu (*Lag*)

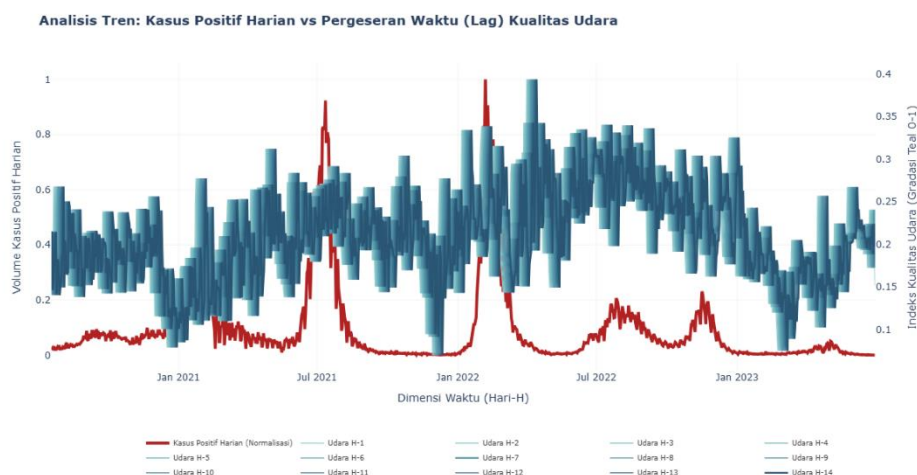
Langkah	Deskripsi
Inisialisasi	path_udara, path_covid, polutan, max_lag = 14
Pemrosesan Data Kualitas Udara	
Baca Data	df_udara = Baca dan hitung rata-rata harian polutan
Normalisasi	For setiap polutan di dalam df_udara: df_udara[polutan_norm] = Normalisasi Min-Max
Rata-rata	df_udara[multivariat] = Rata-rata dari seluruh polutan_norm
Pergeseran Waktu	For i = 1 To max_lag: df_udara[Lag_H(i)] = Geser hari (shift) dari df_udara[multivariat] sebanyak i

Pemrosesan Data COVID-19	
Baca Data	df_covid = Baca data dan sesuaikan format Tanggal
Normalisasi	For setiap target kasus di dalam df_covid: df_covid[target_norm] = Normalisasi Min-Max
Penggabungan Data	df_gabungan = Inner Join(df_udara, df_covid) berdasarkan Tanggal
Perhitungan Korelasi & Visualisasi	
Hitung Korelasi	For setiap target di df_gabungan: For i = 1 To max_lag: Hitung Korelasi Spearman antara target dengan Lag_H(i)
Simpan Hasil	Simpan hasil korelasi
Identifikasi Lag Terkuat	lag_terkuat = Jeda hari dengan nilai korelasi absolut (abs) tertinggi
Visualisasi	Gambar grafik Bar Chart, sorot nilai lag_terkuat

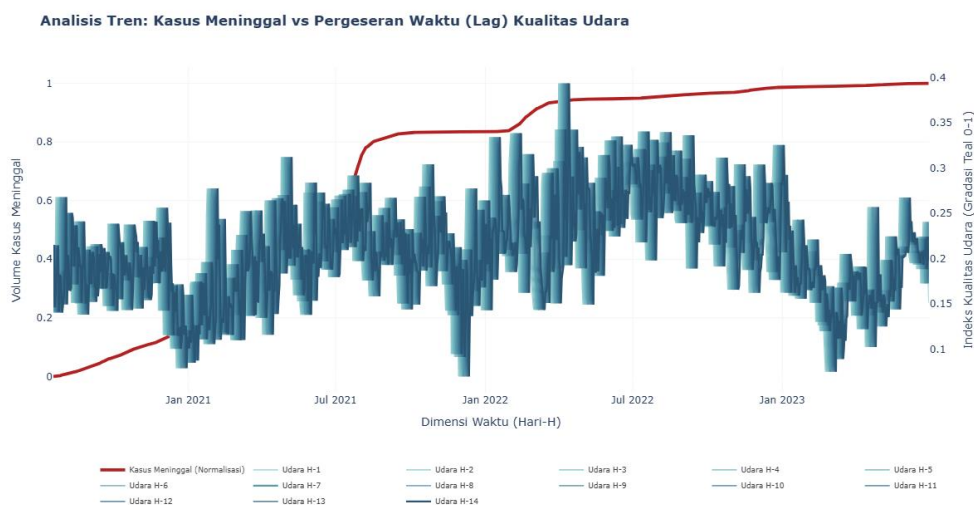
Perlu ditegaskan mengenai cakupan variabel yang dianalisis. Dari sebelas atribut epidemiologi pada Tabel 2, analisis korelasi Spearman difokuskan pada Positif Harian sebagai target utama karena merepresentasikan dinamika transmisi baru, serta Meninggal sebagai target sekunder. Atribut lainnya (Sembuh, *Self Isolation*, Masih Perawatan, Total Pasien, Positif Aktif, Sembuh Harian, Tanpa Gejala, dan Bergejala) mencerminkan status penanganan klinis dan akumulasi kasus, bukan kejadian infeksi baru, sehingga berada di luar cakupan analisis korelasi dan hanya digunakan sebagai konteks deskriptif.

3.1.4 Visualisasi Tren *Dual-Axis (Plotly)*

Sebelum menjalankan uji probabilitas statistik, sistem membuat peta grafis menggunakan chart garis dua sumbu untuk menampilkan keselarasan tren antara kurva kasus harian *COVID-19* dengan 14 lapisan fluktuasi (*lag*) kualitas udara yang ditampilkan dalam skala warna *teal*. Berdasarkan matriks output dari *Jupyter Notebook*, analisis tidak hanya fokus pada kasus positif harian, tetapi diperluas untuk mengeksplorasi tingkat fatalitas absolut, yaitu kasus meninggal. Gambar 2 di bawah ini menunjukkan pergerakan jumlah kasus infeksi baru setiap hari (Positif Harian), sedangkan Gambar 3 secara rinci menjelaskan pergerakan angka kematian (Meninggal).



Gambar 2. Analisis Tren: Kasus Positif Harian vs Pergeseran Waktu (Lag) Kualitas Udara



Gambar 3. Analisis Tren: Kasus Meninggal vs Pergeseran Waktu (Lag) Kualitas Udara

Inspeksi perbandingan terhadap dua visualisasi di atas mengungkapkan kenyataan yang sangat kasar. Pada Gambar 2 dan 3, setiap kali garis merah (*Crimson*) yang menunjukkan peningkatan kasus infeksi atau kematian naik tajam, perubahan tersebut selalu terjadi setelah puncak gelombang polutan (garis *teal*) pada beberapa hari sebelumnya. Persinggungan grafis dalam kasus kematian sangat penting, menunjukkan bahwa racun di udara yang menumpuk tidak hanya meningkatkan jumlah orang yang sakit, tetapi juga berperan langsung sebagai penyebab yang memperparah gagal pernapasan hingga menyebabkan kematian dalam jumlah besar.

3.1.5 Implementasi Metode *Spearman* & Hasil Korelasi

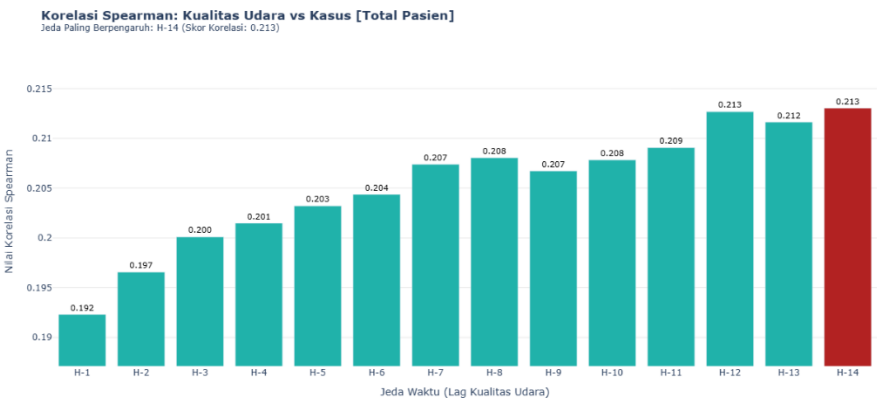
Untuk memverifikasi bahwa pola visual tersebut bukan sekadar kebetulan, model menggunakan uji Korelasi Peringkat *Spearman*. Pemilihan metode statistik non-parametrik ini merupakan keharusan dalam analisis; data kesehatan dan lingkungan cenderung tidak memenuhi asumsi distribusi normal. Menggunakan metode *Spearman* memungkinkan algoritma mengubah data yang tidak bersih menjadi matriks hierarki peringkat, sehingga lebih akurat dalam menangani dinamika wabah yang diisi dengan *outlier* tidak simetris dibandingkan metode statistik konvensional (Nelvidawati & Kasman, 2023). Hasil perhitungan dari 14 parameter *time-lag* tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai Korelasi Spearman Kualitas Udara (H-1 s/d H-14) terhadap Kasus Positif Harian beserta Nilai Signifikansi

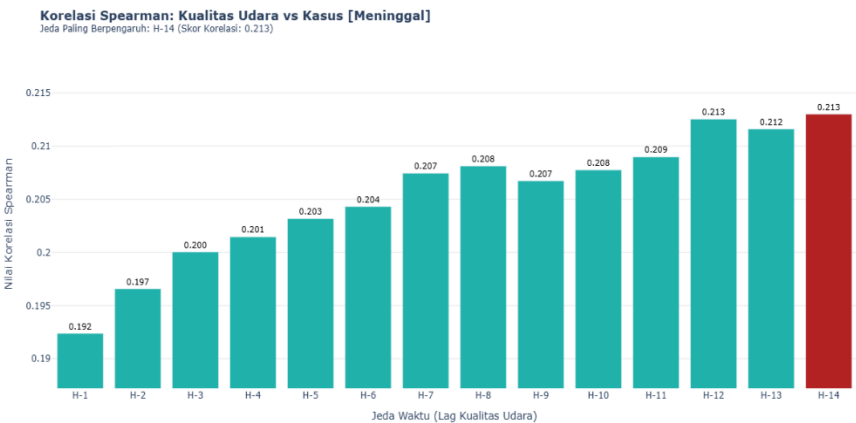
Parameter Lag Waktu	Koefisien Korelasi Spearman (ρ)	Nilai- p (Sig. 2-tailed)
H-1	0.192	<0,001
H-2	0.194	<0,001
H-3	0.197	<0,001
H-4	0.199	<0,001
H-5	0.201	<0,001
H-6	0.203	<0,001
H-7	0.205	<0,001
H-8	0.207	<0,001
H-9	0.208	<0,001
H-10	0.210	<0,001
H-11	0.211	<0,001
H-12	0.213	<0,001

H-13	0.212	<0,001
H-14	0.213	<0,001

Nilai- ρ dihitung dengan aproksimasi distribusi-t ($df = n-2$) terhadap koefisien rho Spearman; jumlah pasangan data efektif pada setiap lag H-k adalah $n = 1.077 - k$. Seluruh lag signifikan pada taraf 0,001 (uji dua sisi).



Gambar 4. Grafik Bar Korelasi Spearman Kualitas Udara vs Kasus (Total Pasien)



Gambar 5. Grafik Bar Korelasi Spearman Kualitas Udara vs Kasus (Meninggal)

Representasi metrik di Tabel 5, Gambar 4, dan Gambar 5 memberikan bukti statistik yang pasti. Batang korelasi mengalami kenaikan secara linear dan mencapai puncaknya pada hari ke-14 (H-14) dengan koefisien utama sebesar 0,213 (*Crimson Red*). Data ini secara matematis membuktikan bahwa asumsi polutan menyebabkan dampak infeksi pada hari yang sama tidak benar. Semakin lama jeda waktu antara paparan dengan munculnya kasus klinis yang tercatat di fasilitas kesehatan, semakin tinggi kemungkinan terjadinya ledakan kasus tersebut. Seluruh koefisien dari H-1 hingga H-14 terbukti signifikan secara statistik ($\rho < 0,001$; uji dua sisi), sehingga hubungan yang dilaporkan tidak lagi bersifat asumsi. Adapun nilai yang identik pada H-12 dan H-14 (0,213) merupakan efek pembulatan tiga angka desimal yang menandakan terbentuknya plateau korelasi pada akhir jendela pengamatan 14 hari, sedangkan fluktuasi sangat kecil pada H-13 (0,212) tidak mengubah tren kenaikan secara umum.

3.2 Pembahasan

Peningkatan korelasi H-14 sebagai jendela paparan terbesar menunjukkan secara langsung bagaimana mekanisme virologi *SARS-CoV-2* bekerja di dunia nyata. Jeda waktu 14 hari ini sesuai dengan batas maksimal periode inkubasi patogen. Ketika populasi perkotaan menghirup racun PM_{2.5} pada hari pertama, partikulat mikro tersebut membutuhkan waktu untuk menembus alveolus, menyebabkan stres oksidatif, serta melemahkan pertahanan imunitas pada membran mukosa. Di dalam ekosistem paru-paru yang sudah tercemar polutan tersebut, virus tumbuh secara cepat, mengubah manusia yang terpapar racun pada hari pertama menjadi angka statistik infeksi dan kematian pada hari ke-14. Dari segi manajemen dan kemampuan beradaptasi di lingkungan nyata, model ini membutuhkan perubahan besar dalam mengelola krisis publik. Kenaikan indeks standar kualitas udara (ISPU) hari ini tidak boleh dianggap remeh; ini adalah tanda peringatan awal bahwa pihak kesehatan memiliki waktu tepat 14 hari untuk menyiapkan stok oksigen medis, memperluas kapasitas ruang perawatan intensif (ICU), dan menerapkan pembatasan wilayah sebelum terjadi kelebihan pasien kritis yang bisa merusak fasilitas rumah sakit.

Temuan ini sejalan sekaligus melengkapi studi Sari (2023) di Kota Padang yang menguji tiap polutan secara terpisah pada Lag 0, 7, 14, dan 21. Dalam studi tersebut, PM10 menunjukkan korelasi positif yang signifikan pada Lag 0 ($r = 0,160$; $p = 0,02$) dan Lag 7 ($r = 0,120$; $p = 0,02$), namun melemah dan tidak lagi signifikan pada Lag 14 ($r = 0,098$; $p = 0,06$) dan Lag 21 ($r = 0,066$; $p = 0,21$), sementara polutan gas seperti CO ($r = -0,376$ hingga $-0,211$), NO₂ ($r = -0,338$ hingga $-0,285$), O₃, dan SO₂ justru berkorelasi negatif pada seluruh lag. Pola tersebut kontras dengan hasil penelitian ini: indeks komposit enam polutan di DKI Jakarta menunjukkan korelasi positif yang justru menguat seiring bertambahnya jeda waktu, dari 0,192 (H-1) hingga 0,213 (H-14). Perbedaan arah dan kekuatan hubungan ini dapat dijelaskan oleh tiga faktor: (1) skala wilayah, karena DKI Jakarta sebagai megapolitan memiliki tingkat emisi dan kepadatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan Padang; (2) periode pengamatan, karena penelitian ini mencakup 1.077 hari (Juli 2020 hingga Juni 2023) dibandingkan data satu tahun pada Sari (2023); dan (3) pendekatan komposit multivariat yang menangkap akumulasi beban polutan secara keseluruhan, bukan satu polutan secara terpisah. Pola efek tertunda serupa juga dilaporkan pada studi di kota-kota Asia lain, seperti korelasi positif CO terhadap kasus harian COVID-19 pada lag 0 hingga 21 di Korea (Hoang & Tran, 2021) serta asosiasi non-linear polutan terhadap kasus harian pada lag 7 dan 14 di Dhaka (Islam *et al.*, 2021). Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan yang perlu dicatat. Pertama, model tidak memasukkan variabel cuaca (suhu, kelembapan, curah hujan, dan kecepatan angin) serta mobilitas penduduk sebagai kovariat, padahal keduanya dapat memengaruhi konsentrasi polutan maupun transmisi virus. Kedua, desain studi ekologi pada level agregat harian tidak dapat menjelaskan paparan pada level individu (ecological fallacy). Ketiga, penggabungan enam polutan menjadi satu skor komposit menyederhanakan efek spesifik masing-masing polutan yang dapat berbeda arah, sebagaimana ditunjukkan oleh Sari (2023). Keterbatasan-keterbatasan ini menjadi landasan bagi saran pengembangan yang disampaikan pada bagian kesimpulan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis Spearman Time-Lagged terhadap 1.077 hari observasi di DKI Jakarta, penelitian ini menghasilkan empat kesimpulan utama. Terdapat hubungan positif yang signifikan secara statistik antara kualitas udara dan kasus positif harian COVID-19 pada seluruh jeda waktu yang diuji (H-1 hingga H-14), dengan koefisien korelasi 0,192 sampai 0,213 dan nilai $q < 0,001$ pada setiap lag. Kekuatan hubungan meningkat seiring bertambahnya jeda waktu dan mencapai puncaknya pada H-14 ($q = 0,213$), yang konsisten dengan masa inkubasi SARS-CoV-2 (5 hingga 14 hari). Temuan ini menunjukkan bahwa penurunan daya tahan saluran pernapasan akibat paparan polutan membutuhkan waktu sekitar dua minggu sebelum bermanifestasi sebagai peningkatan kasus secara klinis.

Model *Spearman Time-Lagged* terbukti berfungsi sebagai sistem peringatan dini: lonjakan polusi udara pada hari ini memberikan sinyal bagi otoritas kesehatan untuk mempersiapkan kapasitas layanan rumah sakit dalam 14 hari ke depan. Penelitian ini memiliki keterbatasan, yaitu tidak dimasukkannya variabel cuaca (suhu, kelembapan, curah hujan, kecepatan angin) dan mobilitas penduduk sebagai kovariat, penggunaan desain studi ekologi agregat yang tidak mengukur paparan pada level individu, serta penyederhanaan enam polutan ke dalam satu skor komposit. Keterbatasan tersebut perlu diperhitungkan dalam interpretasi hasil dan menjadi agenda penelitian lanjutan. Hasil penelitian ini mendorong pemerintah dan pembuat kebijakan untuk mengubah cara berpikir dalam menghadapi bencana dengan memanfaatkan perubahan tingkat Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) di kawasan kota besar sebagai tanda peringatan awal. Lonjakan polusi ekstrem hari ini baru akan terasa sebagai gelombang pasien baru dua minggu kemudian, sehingga otoritas kesehatan memiliki waktu 14 hari untuk mempersiapkan logistik oksigen, memastikan kapasitas ruang isolasi di rumah sakit, serta merancang pembatasan mobilitas publik. Dari sudut pandang tata ruang, pengelolaan infrastruktur perkotaan harus disesuaikan dengan standar kelayakan ventilasi dan sistem penyaring udara di ruang publik tertutup agar bisa mengurangi penumpukan patogen yang bergerak di udara. Untuk penelitian lanjutan, peneliti dianjurkan untuk menggabungkan variabel cuaca tertentu seperti tingkat kelembapan, intensitas hujan, dan kecepatan angin, serta memperluas daerah pengamatan hingga tingkat nasional agar kemampuan prediksi model Time-Lagged dapat diuji pada ekosistem demografi yang lebih kompleks dan beragam.

5. Ucapan Terima Kasih

Artikel ini dibuat sebagai bagian dari tugas akhir untuk menyelesaikan Program Studi S1 Teknik Informatika di Universitas Kristen Satya Wacana. Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada semua pihak yang telah berpartisipasi dalam menyelesaikan penelitian ini. Kepada dosen pembimbing yang telah memberikan saran, bimbingan, dan motivasi berharga sejak tahap perencanaan hingga seluruh proses penyelesaian penyusunan artikel. Juga kepada tim reviewer yang telah memberikan masukan selama proses revisi. Terakhir, penghargaan disampaikan kepada keluarga dan teman-teman yang selalu mendampingi dan berdampingan memberikan dukungan moral, spiritual, serta berpartisipasi dalam diskusi yang bermanfaat dan produktif yang memperkaya kualitas penelitian ini. Semoga karya ini bisa membantu dalam kemajuan ilmu pengetahuan dan masyarakat luas.

6. Daftar Pustaka

- Ahmad, M., Kusumaningtyas, S. D. A., Nurhayati, H., & Khoir, A. N. U. (2019). Analisis dampak diterapkannya kebijakan working from home saat pandemi Covid-19 terhadap kondisi kualitas udara di Jakarta. *Jurnal Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*, 6(3).
- Anggraeni, S. H. D. A., Darundiati, Y. H., & Joko, T. (2021). Analisis konsentrasi PM10 hasil pengukuran stasiun BMKG Kemayoran di Jakarta Pusat pada masa pandemi COVID-19. *Media Kesehatan Masyarakat Indonesia*, 20(1), 63-69.
- Galsuren, J., Dambadarjaa, D., Tighe, R. M., Gray, G. C., & Zhang, J. (2025). Particulate matter exposure and viral infections: Relevance to highly polluted settings such as Ulaanbaatar, Mongolia. *Current Environmental Health Reports*, 12, 22.

- Hastiaty, I. A., Kusnopranto, H., Achmadi, U. F., & Hermawati, E. (2024). Model prediksi hubungan polusi udara terhadap kasus Covid-19 di Kota Tangerang tahun 2020-2022. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 23(2), 170-181.
- Hoang, T., & Tran, T. T. A. (2021). Ambient air pollution, meteorology, and COVID-19 infection in Korea. *Journal of Medical Virology*, 93(2), 878-885.
- Islam, M. S., Rahman, M., Tusher, T. R., Roy, S., & Razi, M. A. (2021). Assessing the relationship between COVID-19, air quality, and meteorological variables: A case study of Dhaka City in Bangladesh. *Aerosol and Air Quality Research*, 21, 200609.
- Isnaini, M., & Sulastris, S. (2023). Analisis dampak Covid-19 terhadap tingkat inflasi di Indonesia. *Jurnal MSA (Matematika dan Statistika serta Aplikasinya)*, 11(2), 57-63.
- Maleki, M., Anvari, E., Hopke, P. K., Noorimotlagh, Z., & Mirzaee, S. A. (2021). An updated systematic review on the association between atmospheric particulate matter pollution and prevalence of SARS-CoV-2. *Environmental Research*, 195, 110898.
- Nabiha, P. Z. (2023). Analisis kualitas udara (PM 2.5) dan faktor iklim (kelembapan dan curah hujan) dengan kejadian tuberkulosis di Jakarta (Doctoral dissertation, Universitas Airlangga).
- Nelvidawati, N., & Kasman, M. (2023). Penggunaan korelasi Spearman untuk menguji hubungan suhu dan besarnya curah hujan bulanan di Kota Padang. *Jurnal Daur Lingkungan*, 6(1), 34-39.
- Nurhalijah, S. D., Nina, C., Romadhona, A., Maulani, N., & Rahayu, M. S. (2024). Analisis korelasi Spearman untuk mengetahui hubungan antara penggunaan media sosial dan tingkat produktivitas akademis mahasiswa agribisnis (Studi kasus: Universitas Sultan Ageng Tirtayasa). *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 10(16), 800-809.
- Pakasi, T. A., & Pakasi, L. S. (2020). Pentingnya pengendalian udara lingkungan untuk pencegahan transmisi SARS CoV2. *CoMPHI Journal: Community Medicine and Public Health of Indonesia Journal*, 1(2), 109-116.
- Putra, R. S., Mariati, H., & Osronita, O. (2023). Perbandingan kualitas udara sebelum dan selama PSBB COVID-19 di Kota Padang berbasis penginderaan jauh. *Jurnal Azimut*, 5(2), 90-103.
- Ratnasari, A., & Asharhani, I. S. (2021). Aspek kualitas udara, kenyamanan termal dan ventilasi sebagai acuan adaptasi hunian pada masa pandemi. *Arsir*, 24-34.
- Santurtún, A., Colom, M. L., Fdez-Arroyabe, P., Real, Á. D., Fernández-Olmo, I., & Zarrabeitia, M. T. (2022). Exposure to particulate matter: Direct and indirect role in the COVID-19 pandemic. *Environmental Research*, 206, 112261.
- Sari, P. N. (2023). Correlation between criteria air pollutants and daily case of COVID-19 pandemic in Padang City. *Srinwijaya Journal of Environment*, 8(3), 136-141.
- Shao, L., Cao, Y., Jones, T., Santosh, M., Silva, L. F. O., Ge, S., da Boit, K., Feng, X., Zhang, M., & Bérubé, K. (2022). COVID-19 mortality and exposure to airborne PM2.5: A lag time correlation. *Science of The Total Environment*, 806, 151286.

- Sibarani, R. M., Belgaman, H. A., Athoillah, I., & Wirahma, S. (2021). Analisis hubungan parameter cuaca terhadap konsentrasi polutan (PM2.5 dan CO) di wilayah Jakarta selama periode work from home (WFH) Maret 2020. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 22(2), 85-94.
- Siddharta, O. J., & Trisnawarman, D. (2026). Analisis polutan udara harian Jakarta menggunakan Mann–Whitney dan korelasi Spearman. *Jurnal Ilmu Komputer Dan Sistem Informasi*, 14(1).
- Suhardono, S., Septiariva, I. Y., Rachmawati, S., Matin, H. H. A., Qona'ah, N., Nirwana, B., ... & Prayogo, W. (2023). Changes in the distribution of air pollutants (Carbon Monoxide) during the control of the COVID-19 pandemic in Jakarta, Surabaya, and Yogyakarta, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 24(4).
- Waryatno, N. F. P., & Kinanti, N. P. (2022). Kondisi pencemaran udara pada saat periode lebaran 2022 di wilayah Jakarta. *Buletin GAW Bariri (BGB)*, 3(2).
- World Health Organization. (2023). *Clinical management of COVID-19: Living guideline*. Geneva: World Health Organization.
- Zahra, N. L., Haidar, F. A., Hanum, Y. A. S. M. I. N., Ramadhanti, D. E. L. A. F. A. N. Y., Ramadhan, R. I. Z. K. I., Rahman, A., ... & Ridhosari, B. E. T. A. N. T. I. (2022). Pemantauan kualitas udara ambien di kompleks Universitas Pertamina pada masa pandemi COVID-19: Monitoring of ambient air quality in Universitas Pertamina areas during the COVID-19 pandemic. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 23(1), 084-091.