

ANALISIS POLUTAN UDARA HARIAN JAKARTA MENGGUNAKAN MANN–WHITNEY DAN KORELASI SPEARMAN

Onggo Julius Siddharta ¹⁾ Dedi Trisnawarman ²⁾

¹⁾²⁾ Fakultas Teknologi Informasi Universitas Tarumanagara

Jl. Letjen S. Parman No.1, Tomang, Grogol petamburan, Jakarta Barat 11440

email : julius.siddharta@gmail.com ¹⁾ dedit@fti.untar.ac.id ²⁾

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis hubungan antara faktor meteorologis dan tingkat kesesuaian harian polutan udara di Jakarta terhadap standar WHO 2021. Pendekatan penelitian yang digunakan adalah kuantitatif eksplanatif dengan metode statistik non-parametrik, yaitu uji Mann–Whitney U dan Korelasi Spearman. Data yang digunakan berupa pengamatan harian selama periode 2014–2024 yang diperoleh dari BMKG dan Dinas Lingkungan Hidup DKI Jakarta. Tahapan penelitian meliputi pra-pemrosesan data, klasifikasi tingkat kesesuaian polutan, uji perbedaan distribusi, dan analisis hubungan antar variabel cuaca dan polutan. Hasil uji Mann–Whitney U menunjukkan perbedaan signifikan pada sebagian besar variabel cuaca antara hari yang sesuai dan tidak sesuai terhadap standar WHO. Analisis Korelasi Spearman menunjukkan hubungan positif antara suhu dengan ozon (O_3) dan karbon monoksida (CO), serta hubungan negatif antara kelembaban dan polutan primer seperti PM_{10} , SO_2 , dan NO_2 . Hasil penelitian ini menegaskan bahwa kondisi panas dan kering memperburuk kualitas udara, sedangkan kondisi lembab dan hujan membantu memperbaiki.

Key words

kualitas udara, uji Mann–Whitney U, korelasi Spearman, faktor meteorologis, WHO

1. Pendahuluan

Isu kualitas udara kini menjadi perhatian global karena berpengaruh langsung terhadap kesehatan manusia, produktivitas ekonomi, serta kestabilan lingkungan [1]. Organisasi Kesehatan Dunia (World Health Organization/WHO) memperkirakan lebih dari tujuh juta kematian dini setiap tahun disebabkan oleh paparan polutan udara seperti ozon (O_3), nitrogen dioksida (NO_2), sulfur dioksida (SO_2), karbon monoksida (CO), dan partikel kasar (PM_{10}) [2]. Untuk menekan risiko tersebut, WHO pada tahun 2021 menerbitkan pedoman baru Air Quality Guidelines (AQG) yang memperketat ambang batas harian polutan utama agar perlindungan kesehatan masyarakat menjadi lebih optimal [3].

Di Indonesia, terutama di wilayah metropolitan seperti Jakarta, permasalahan polusi udara semakin kompleks akibat kombinasi aktivitas transportasi padat, proses industri, serta kondisi meteorologis yang memperburuk penumpukan polutan di atmosfer [4]. Laporan Dinas Lingkungan Hidup DKI Jakarta menunjukkan bahwa nilai Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) sering kali melampaui kategori “tidak sehat” pada musim kemarau ketika kelembapan udara rendah dan kecepatan angin berkurang [5]. Kondisi ini menegaskan pentingnya pendekatan analitik berbasis data untuk menilai tingkat kesesuaian konsentrasi polutan terhadap standar WHO 2021 serta memahami keterkaitan faktor cuaca terhadap dinamika kualitas udara perkotaan.

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa variabel meteorologi memiliki pengaruh signifikan terhadap konsentrasi polutan. Choi et al. melaporkan bahwa suhu dan kelembaban relatif berperan besar dalam pembentukan ozon troposfer di kota-kota besar Asia Tenggara. Sementara itu, penelitian di Kuala Lumpur dan Bangkok menemukan hubungan non-linear antara curah hujan, kecepatan angin, dan konsentrasi partikulat [6]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada analisis korelasi linier atau model regresi parametrik yang mengasumsikan distribusi data normal, padahal data lingkungan cenderung bersifat non-linier dan memiliki nilai ekstrim (outlier).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, metode statistik non-parametrik seperti Mann–Whitney U test dan Korelasi Spearman digunakan karena tidak bergantung pada asumsi kenormalan dan lebih tahan terhadap data ekstrem [7], [8]. Uji Mann–Whitney U berfungsi menilai perbedaan median antara dua kelompok (misalnya hari “sesuai” dan “tidak sesuai” dengan ambang WHO), sedangkan Korelasi Spearman mengukur kekuatan serta arah hubungan monoton antara faktor meteorologi dan tingkat kesesuaian polutan.

Dalam konteks Jakarta, penelitian yang menggabungkan kedua pendekatan non-parametrik ini masih jarang dilakukan, padahal data observasi harian yang tersedia dari BMKG dan DLH DKI Jakarta membuka peluang besar untuk melakukan analisis empiris jangka panjang. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola kesesuaian harian polutan udara di Jakarta terhadap

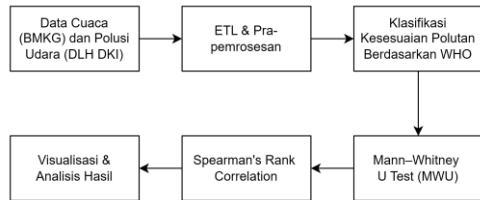
standar WHO 2021 serta mengevaluasi hubungan antara variabel cuaca dan tingkat kesesuaian polutan menggunakan metode Mann–Whitney U dan Korelasi Spearman. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi pengambilan keputusan dan perumusan kebijakan pengendalian polusi udara yang lebih adaptif terhadap kondisi meteorologis lokal.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksplanatif non-parametrik untuk mengevaluasi hubungan antara variabel meteorologi dan tingkat kesesuaian polutan udara di Jakarta terhadap standar WHO 2021. Pendekatan non-parametrik dipilih karena data kualitas udara dan cuaca umumnya tidak berdistribusi normal serta mengandung nilai ekstrim (*outlier*) yang dapat mempengaruhi validitas uji parametrik [9], [10].

Proses penelitian dilakukan secara bertahap dan sistematis, dimulai dari pengumpulan data sekunder, pra-pemrosesan, klasifikasi tingkat kesesuaian polutan, pengujian statistik menggunakan Mann–Whitney U dan Korelasi Spearman, hingga visualisasi pola hasil analisis [11].

Alur keseluruhan penelitian ditunjukkan pada **Gambar 1**, yang menjelaskan tahapan utama mulai dari data mentah hingga interpretasi hasil analisis.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

2.1. Data Penelitian

Data penelitian ini diperoleh dari dua sumber utama, yaitu Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) untuk data cuaca harian dan Dinas Lingkungan Hidup (DLH) DKI Jakarta untuk data kualitas udara. Periode pengamatan mencakup tahun 2014 hingga 2024, dengan total 4.018 observasi harian. Kedua dataset digabungkan pada tingkat kota (*city-level*) menggunakan kolom tanggal sebagai kunci penggabungan.

Data cuaca mencakup variabel suhu minimum, maksimum, dan rata-rata ($^{\circ}\text{C}$), kelembapan rata-rata (%), curah hujan (mm), lama penyinaran (jam), serta kecepatan angin maksimum dan rata-rata (m/s). Sementara itu, data kualitas udara mencakup parameter utama PM_{10} , SO_2 , CO , O_3 , dan NO_2 , yang diukur dalam satuan $\mu\text{g}/\text{m}^3$ atau mg/m^3 sesuai standar Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) [3].

Seluruh data telah melalui proses pra-pemrosesan menggunakan Python pada platform *Jupyter Notebook*,

meliputi penghapusan nilai kosong, pengisian nilai hilang dengan metode *forward-fill* dan *backward-fill*, serta standarisasi nama kolom dan satuan. Dataset hasil bersih digunakan sebagai input utama untuk analisis statistik Mann–Whitney U dan Korelasi Spearman.

Pemilihan periode 2014–2024 dimaksudkan untuk menampilkan pola perubahan cuaca dan polusi udara di Jakarta selama sepuluh tahun terakhir, dengan mempertimbangkan pengaruh musim dan dinamika iklim mikro [12], [13], [14].

Tabel 1. Profil data penelitian

Kategori	Atribut	Keterangan
Cuaca (BMKG)	Suhu_min, suhu_max, suhu_avg	Suhu udara harian ($^{\circ}\text{C}$).
	kelembapan_avg	Kelembapan rata-rata (%).
	curah_hujan	Curah hujan harian (mm).
	lama_penyinaran	Durasi penyinaran matahari (jam).
	Kecepatan_angin_maks, kecepatan_angin_avg	Kecepatan angin maksimum dan rata-rata (m/s).
Kualitas Udara (DLH DKI)	pm10	Konsentrasi partikulat kasar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
	so2	Konsentrasi sulfur dioksida ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
	co	Konsentrasi karbon monoksida (mg/m^3).
	o3	Konsentrasi ozon troposferik ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
	no2	Konsentrasi nitrogen dioksida ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

2.2. Pra-pemrosesan

Pada tahap pra-pemrosesan, data mentah dari dua sumber digabungkan berdasarkan tanggal dan kemudian dibersihkan dengan menghapus duplikasi, menangani nilai hilang menggunakan forward-fill dan backward-fill, serta menghapus kolom dengan >50% nilai kosong. Nilai ekstrim yang tidak realistis dicek dan diganti menggunakan median lokal. Alle satuan dan nama kolom diseragamkan agar konsisten, lalu dibuat flag biner tanda “sesuai/tidak sesuai” terhadap ambang World Health Organization (WHO) 2021 untuk setiap polutan [15], [16], [17].

2.3. Mann–Whitney U Test

Mann–Whitney U digunakan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan distribusi antara dua kelompok independen, yaitu hari sesuai dan hari tidak sesuai terhadap standar WHO 2021. Metode ini dipilih karena termasuk uji non-parametrik yang tidak mensyaratkan distribusi normal dan tetap reliabel meskipun data mengandung pencilan [1].

Uji ini sangat relevan digunakan dalam konteks data lingkungan, karena variabel meteorologis dan polutan umumnya memiliki sebaran yang tidak stabil, dipengaruhi oleh dinamika cuaca harian, dan sering kali tidak mengikuti pola distribusi yang simetris.

Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan pada setiap variabel cuaca seperti suhu, kelembapan, curah hujan, lama penyinaran, dan kecepatan angin terhadap status kesesuaian lima polutan, yaitu PM₁₀, SO₂, CO, O₃, dan NO₂. Klasifikasi hari sesuai dan tidak sesuai mengacu pada ambang batas kualitas udara dalam baku mutu WHO 2021. Melalui pendekatan ini, uji *Mann–Whitney* digunakan untuk melihat apakah variasi kondisi meteorologis berkaitan dengan perbedaan pencapaian standar kualitas udara pada setiap hari pengamatan.

Hipotesis nol (H_0) menyatakan bahwa tidak terdapat perbedaan distribusi antara dua kelompok, sedangkan hipotesis alternatif (H_1) menyatakan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan. Nilai statistik U dihitung menggunakan rumus berikut:

$$U = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1 \quad (1)$$

Dengan n_1 dan n_2 masing-masing mewakili jumlah sampel pada dua kelompok, sedangkan R_1 adalah total peringkat yang diperoleh kelompok pertama. Keputusan pengujian ditentukan dengan menolak hipotesis nol (H_0) apabila nilai p berada di bawah 0,05.

2.4. Korelasi Spearman

Korelasi Spearman digunakan untuk mengukur kekuatan dan arah hubungan antara dua variabel berdasarkan peringkat nilai data. Metode ini termasuk uji non-parametrik yang tidak bergantung pada asumsi distribusi normal, sehingga sesuai digunakan untuk data

cuaca dan kualitas udara yang cenderung tidak homogen [1].

Dalam penelitian ini, korelasi Spearman digunakan untuk menilai hubungan antara variabel meteorologi (suhu, kelembapan, curah hujan, lama penyinaran, dan kecepatan angin) dengan konsentrasi polutan udara (PM₁₀, SO₂, CO, O₃, dan NO₂). Nilai koefisien korelasi Spearman (ρ) menunjukkan arah dan kekuatan hubungan, di mana $\rho > 0$ menandakan hubungan searah, sedangkan $\rho < 0$ menunjukkan hubungan berlawanan. Rumus koefisien korelasi Spearman dituliskan sebagai berikut:

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

Nilai d_i merupakan selisih peringkat antara dua variabel pada pengamatan ke- i , sedangkan n menunjukkan jumlah total pasangan data yang diamati. Semakin mendekati 1 nilai absolut $|\rho|$, semakin kuat hubungan antar variabel, sementara nilai mendekati 0 menunjukkan hubungan yang lemah atau tidak ada hubungan.

Interpretasi kekuatan hubungan mengikuti pedoman umum, yakni sangat lemah (0,00–0,19), lemah (0,20–0,39), sedang (0,40–0,59), kuat (0,60–0,79), dan sangat kuat (0,80–1,00) [2]. Analisis ini digunakan untuk menilai sejauh mana faktor meteorologis berhubungan dengan variasi konsentrasi polutan udara harian di Jakarta sepanjang periode 2014–2024.

2.5. Visualisasi Data Analitik

Visualisasi data analitik digunakan untuk memperjelas hasil pengujian statistik yang dilakukan dengan metode Mann–Whitney U dan Korelasi Spearman. Setiap bentuk grafik dirancang untuk menampilkan pola hubungan antara kondisi meteorologis dan tingkat kesesuaian polutan udara di Jakarta selama periode 2014–2024.

Diagram batang digunakan untuk menggambarkan persentase tahunan hari yang tidak memenuhi standar WHO pada masing-masing poln. Peta panas (heatmap) menampilkan variasi ketidaksesuaian secara bulanan dan antar-polutan, sedangkan *boxplot* memperlihatkan perbedaan sebaran variabel cuaca antara dua kategori, yaitu hari sesuai dan tidak sesuai terhadap standar WHO.

Hasil korelasi divisualisasikan dalam peta panas untuk menunjukkan kekuatan dan arah hubungan antara variabel cuaca dan polutan udara. Sementara itu, scatter grid digunakan untuk menampilkan pola hubungan antar variabel secara lebih rinci, termasuk kecenderungan linier maupun non-linier. Gabungan berbagai bentuk visualisasi ini membantu peneliti memahami keterkaitan antar parameter lingkungan sebelum dilakukan interpretasi mendalam pada tahap pembahasan.

Tabel 2. Jenis visualisasi dan tujuan analisis

Jenis Visualisasi	Tujuan Analisis
Diagram batang tahunan	Menampilkan persentase hari yang melampaui ambang batas WHO 2021 untuk setiap polutan agar perubahan tingkat kepatuhan kualitas udara dapat diamati dari tahun ke tahun.
Heatmap distribusi bulanan	Menggambarkan variasi tingkat ketidaksesuaian polutan berdasarkan bulan dan tahun untuk mengidentifikasi pola musiman dan periode dengan intensitas pencemaran tertinggi.
Panel distribusi hasil uji Mann–Whitney U	Memvisualisasikan perbedaan sebaran variabel cuaca antara dua kategori (hari sesuai dan tidak sesuai terhadap standar WHO), disertai nilai <i>p-value</i> , arah hubungan, serta perbedaan median antar kelompok.
Heatmap korelasi Spearman	Menunjukkan kekuatan dan arah hubungan antara variabel cuaca dan polutan udara melalui koefisien korelasi Spearman (ρ), untuk mengidentifikasi faktor meteorologis yang paling berpengaruh terhadap kualitas udara.

3. Hasil dan Pembahasan

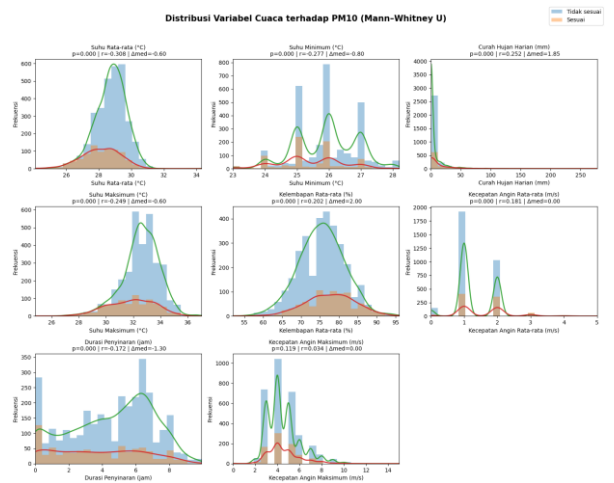
3.1 Hasil Uji Mann–Whitney U

Uji Mann–Whitney U digunakan untuk melihat apakah ada perbedaan nyata pada sebaran data cuaca antara dua jenis hari, yaitu hari yang sesuai dan tidak sesuai dengan standar WHO 2021. Uji ini dipilih karena data cuaca dan kualitas udara sering kali tidak mengikuti pola normal dan mengandung nilai yang ekstrem, sehingga metode ini lebih tepat digunakan dibandingkan uji yang mengandalkan asumsi distribusi normal.

Hasilnya ditampilkan dalam bentuk panel grafik yang berisi gabungan antara histogram dan kurva garis halus (*kernel density estimation*) untuk setiap jenis polutan, yaitu PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃, dan CO. Grafik ini membantu memperlihatkan perbedaan bentuk sebaran data antara kedua kelompok hari secara lebih mudah.

Setiap panel juga menampilkan nilai *p*, nilai *r*, dan selisih median (Δmed) untuk menunjukkan seberapa besar dan searah apa perbedaan antara kedua kelompok. Informasi ini membantu memahami hubungan antara

kondisi cuaca dan tingkat kesesuaian polutan udara terhadap standar WHO.

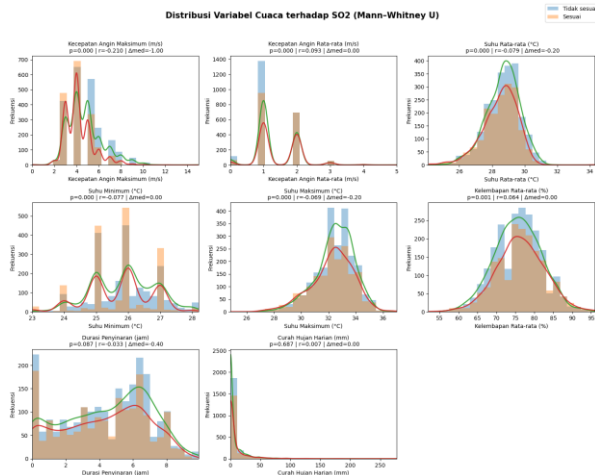


Gambar 2. Distribusi variabel cuaca terhadap PM₁₀

Hasil uji Mann–Whitney U menunjukkan adanya perbedaan yang jelas pada suhu udara antara hari yang sesuai dan tidak sesuai dengan standar WHO. Konsentrasi PM₁₀ yang tinggi lebih sering muncul pada kondisi suhu rata-rata, maksimum, dan minimum yang lebih tinggi. Hal ini berkaitan dengan peningkatan penguapan air permukaan serta aktivitas manusia seperti lalu lintas kendaraan dan pembakaran bahan bakar yang menghasilkan partikel debu di atmosfer.

Kelembapan udara yang rendah cenderung meningkatkan kadar PM₁₀ karena udara kering menghambat proses pengendapan partikel. Sebaliknya, curah hujan berperan penting dalam menurunkan polusi partikulat melalui proses pencucian alami di atmosfer. Ketika hujan berkurang, jumlah partikel meningkat karena tidak terjadi pembersihan udara secara alami.

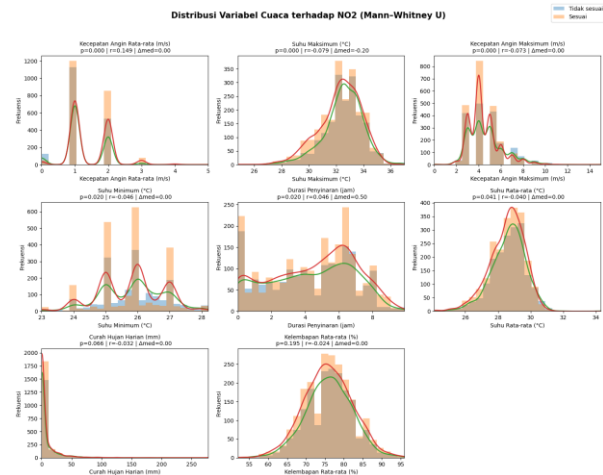
Durasi penyinaran matahari menunjukkan hubungan yang cukup kuat dengan variasi konsentrasi PM₁₀. Hari dengan durasi penyinaran yang singkat umumnya diikuti dengan tingginya kadar partikel, yang mungkin disebabkan oleh terbatasnya proses dispersi vertikal dan akumulasi emisi pada lapisan bawah atmosfer. Kecepatan angin berperan penting dalam proses penyebaran polutan. Grafik menunjukkan bahwa hari dengan kecepatan angin rendah sering diikuti oleh peningkatan PM₁₀, mengindikasikan kondisi stagnan yang menyebabkan akumulasi polutan di permukaan. Temuan ini menegaskan bahwa kondisi panas, kering, dan tenang secara atmosferik menjadi faktor dominan dalam peningkatan konsentrasi PM₁₀ di Jakarta.

Gambar 3. Distribusi variabel cuaca terhadap SO₂

Pola distribusi untuk SO₂ memperlihatkan bahwa perbedaan antara hari yang sesuai dan tidak sesuai dengan standar WHO cenderung kecil, namun beberapa variabel meteorologi tetap menunjukkan pengaruh. Suhu udara rata-rata yang lebih tinggi sedikit berhubungan dengan meningkatnya konsentrasi SO₂. Meskipun perbedaan nilai tengahnya tidak besar, hal ini menunjukkan bahwa pembentukan dan penyebaran SO₂ dapat meningkat pada kondisi panas, karena laju reaksi kimia di udara yang lebih cepat.

Kelembaban udara memiliki hubungan yang bervariasi terhadap SO₂. Dalam kondisi kelembaban tinggi, gas ini dapat bereaksi dengan uap air membentuk asam sulfat yang kemudian terlarut dan mengendap. Hal tersebut menjelaskan mengapa kadar SO₂ menurun ketika kelembaban meningkat. Curah hujan tampaknya berperan serupa dalam mengurangi kadar SO₂ melalui proses deposisi basah, meskipun efeknya tidak selalu konsisten setiap tahun.

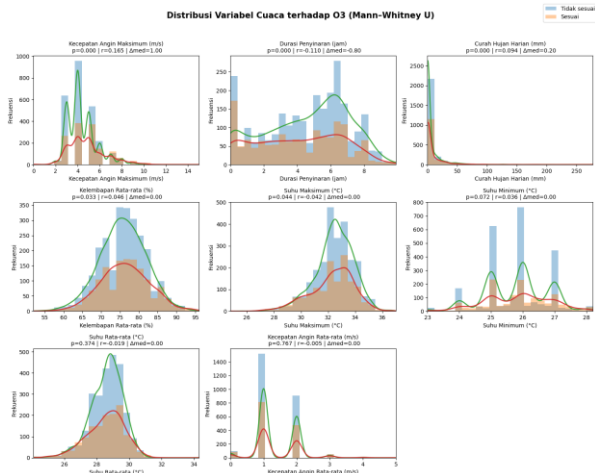
Durasi penyinaran dan kecepatan angin menunjukkan pengaruh tidak terlalu kuat. Aktivitas emisi dari sumber seperti kendaraan bermotor dan pembakaran bahan bakar fosil kemungkinan lebih dominan dibandingkan faktor meteorologi dalam menentukan variasi harian SO₂. Secara umum, hasil ini mengindikasikan bahwa SO₂ di Jakarta lebih banyak dikontrol oleh sumber emisi manusia, sementara kondisi cuaca hanya berperan dalam mempercepat atau memperlambat penyebarannya.

Gambar 4. Distribusi variabel cuaca terhadap NO₂

Distribusi variabel meteorologi untuk NO₂ memperlihatkan pola yang menarik. Suhu udara yang lebih rendah sering diikuti oleh peningkatan kadar NO₂. Fenomena ini sejalan dengan sifat kimia NO₂ yang cenderung terurai oleh radiasi matahari. Saat suhu dan intensitas penyinaran menurun, proses fotolisis yang menguraikan NO₂ menjadi NO dan O₂ berkurang, sehingga gas ini lebih mudah menumpuk di atmosfer.

Durasi penyinaran memiliki pengaruh yang nyata terhadap kadar NO₂. Hari yang mendung atau memiliki sinar matahari terbatas memperlihatkan peningkatan konsentrasi gas ini. Hal tersebut menunjukkan peran penting sinar matahari dalam pengendalian alami polusi udara di daerah perkotaan. Kelembaban udara juga menunjukkan perbedaan yang signifikan. Kadar NO₂ meningkat pada kondisi lembab, kemungkinan karena reaksi kimia antara nitrogen oksida dan uap air yang menghasilkan partikel sekunder.

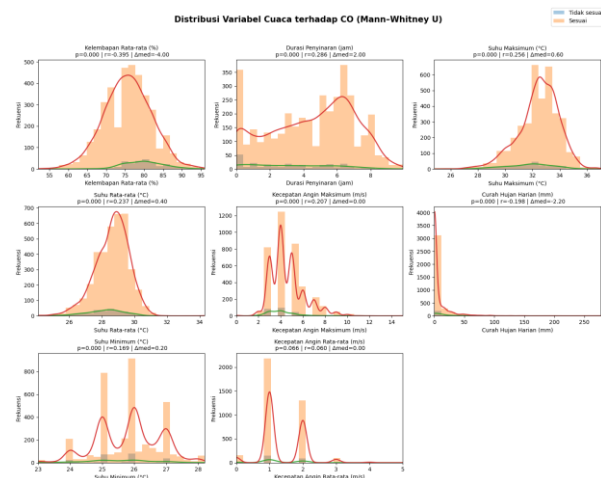
Curah hujan dan kecepatan angin berperan dalam proses pembersihan atmosfer. Ketika curah hujan meningkat atau kecepatan angin tinggi, kadar NO₂ menurun karena terjadi proses pencampuran udara dan deposisi basah. Hasil ini menunjukkan bahwa konsentrasi NO₂ sangat bergantung pada kombinasi antara kondisi meteorologi dan sumber emisi, terutama lalu lintas padat dan pembakaran bahan bakar di perkotaan.

Gambar 5. Distribusi variabel cuaca terhadap O₃

Pola O₃ berbeda dari polutan lainnya karena ozon merupakan polutan sekunder yang terbentuk melalui reaksi fotokimia. Hasil uji menunjukkan bahwa kadar O₃ meningkat pada kondisi suhu udara yang lebih tinggi dan durasi penyinaran panjang. Hal ini terjadi karena reaksi antara senyawa nitrogen oksida dan senyawa organik volatil yang diaktifkan oleh energi radiasi matahari berlangsung lebih cepat saat udara panas dan kering.

menurun karena uap air menyerap sebagian radiasi ultraviolet yang dibutuhkan dalam pembentukan ozon. Curah hujan juga berperan dalam mengurangi kadar ozon di atmosfer, baik melalui penyerapan langsung maupun dengan mengubah stabilitas lapisan udara.

Kecepatan angin mempengaruhi proses transportasi O₃ dari satu wilayah ke wilayah lain. Pada hari dengan angin kencang, kadar ozon cenderung lebih merata dan tidak terlalu tinggi di satu lokasi. Sebaliknya, ketika angin lemah, ozon dapat terakumulasi di daerah tertentu. Pola ini memperlihatkan bahwa ozon troposferik di Jakarta lebih banyak terbentuk pada kondisi cerah, panas, dan relatif kering.



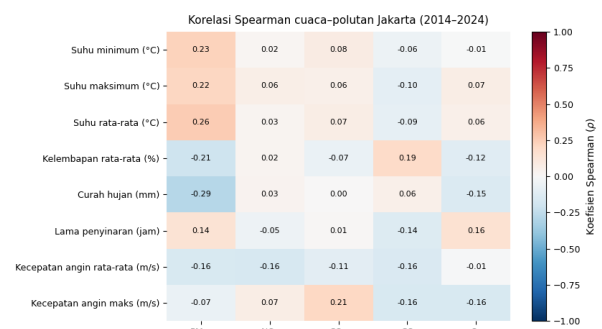
Gambar 6. Distribusi variabel cuaca terhadap CO

Distribusi CO memperlihatkan perbedaan yang kuat antara hari sesuai dan tidak sesuai dengan standar WHO. Konsentrasi CO meningkat pada kondisi cuaca panas dengan kelembapan yang rendah dan penyinaran matahari yang cukup lama. Hal ini sejalan dengan aktivitas lalu lintas dan penggunaan bahan bakar fosil yang tinggi pada siang hari.

Durasi penyinaran yang panjang dapat meningkatkan proses pembentukan CO dari reaksi oksidasi tidak sempurna terhadap hidrokarbon. Namun pada saat yang sama, kondisi udara yang stabil menyebabkan CO sulit terdispersi ke lapisan atas. Kecepatan angin yang rendah memperparah akumulasi gas ini, terutama di daerah padat kendaraan. Curah hujan terbukti efektif dalam menurunkan kadar CO karena tetesan air dapat menangkap molekul gas dan mempercepat proses pengendapan ke permukaan tanah.

Secara keseluruhan, peningkatan CO sering ditemukan pada kondisi panas, kering, dan minim angin. Hal ini menunjukkan bahwa polusi CO di Jakarta sangat dipengaruhi oleh emisi kendaraan bermotor yang tidak segera tersebar oleh proses alami atmosfer.

3.2 Hasil Spearman's Rank Correlation



Gambar 7. Korelasi Spearman antara cuaca dan polutan di Jakarta (2014–2024)

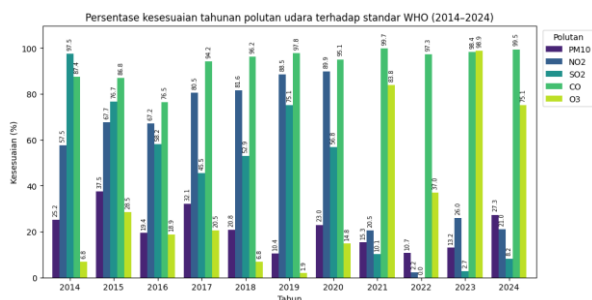
Hasil analisis korelasi Spearman menunjukkan bahwa hubungan antara parameter cuaca dan konsentrasi polutan udara di Jakarta selama 2014–2024 bersifat bervariasi namun tetap menunjukkan pola yang konsisten pada beberapa variabel utama. Suhu, kelembapan, curah hujan, penyinaran, dan kecepatan angin memiliki peran berbeda dalam mempengaruhi kadar polutan. Suhu udara memiliki korelasi positif dengan PM₁₀, menandakan bahwa peningkatan suhu cenderung diikuti peningkatan partikel di atmosfer. Kondisi udara panas mempercepat penguapan air permukaan dan memicu pelepasan debu, sementara gas seperti SO₂, NO₂, dan CO hanya menunjukkan hubungan lemah terhadap suhu. Untuk ozon, hubungan positif lemah menggambarkan bahwa suhu tinggi dan radiasi kuat mendukung pembentukannya secara fotokimia.

Kelembapan dan curah hujan memiliki hubungan negatif dengan PM₁₀ dan ozon, yang berarti peningkatan kedua variabel ini membantu menurunkan konsentrasi polutan. Udara lembab mempercepat pengendapan

partikel dan menurunkan intensitas radiasi matahari, sedangkan curah hujan berperan penting dalam membersihkan atmosfer melalui proses deposisi basah. Sebaliknya, karbon monoksida menunjukkan sedikit korelasi positif dengan kelembaban karena udara lembab memperlambat penyebaran gas. Hubungan antara penyinaran matahari dengan ozon dan PM_{10} bersifat positif, menunjukkan bahwa hari dengan durasi penyinaran lebih lama umumnya memiliki kadar polusi lebih tinggi akibat peningkatan aktivitas manusia dan reaksi fotokimia di udara.

Kecepatan angin menunjukkan korelasi negatif terhadap sebagian besar polutan, menandakan bahwa angin berperan penting dalam proses dispersi dan pencampuran udara. Semakin tinggi kecepatan angin, semakin rendah konsentrasi PM_{10} , NO_2 , dan CO di atmosfer. Korelasi positif lemah antara kecepatan angin maksimum dan SO_2 menunjukkan kemungkinan perpindahan gas dari wilayah industri sekitar Jakarta. Secara keseluruhan, kondisi panas, kering, dan minim angin cenderung memperburuk kualitas udara, sedangkan curah hujan dan angin kuat membantu memperbaikinya melalui mekanisme pembersihan alami atmosfer.

3.3 Pola Kualitas Udara terhadap Standar WHO

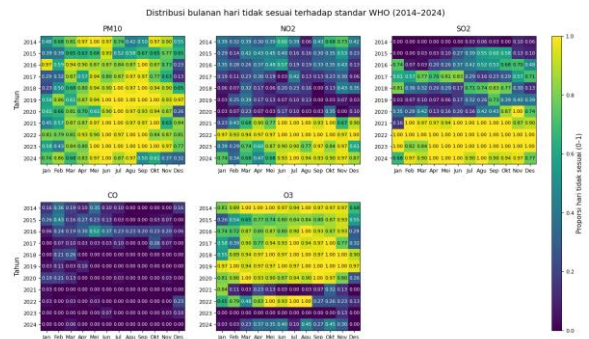


Gambar 8. Pola kesesuaian tahunan polutan terhadap standar WHO (2014–2024)

Selama periode 2014 hingga 2024, tingkat kesesuaian tahunan lima polutan udara utama di Jakarta, yaitu PM_{10} , NO_2 , SO_2 , CO, dan O_3 mengalami fluktuasi dengan kecenderungan perbaikan setelah tahun 2019. Polutan CO dan SO_2 menunjukkan tingkat kesesuaian paling tinggi hampir di seluruh periode dengan nilai di atas 80 persen, yang menandakan bahwa konsentrasi keduanya jarang melampaui ambang batas WHO. Kondisi ini diduga berkaitan dengan peningkatan efisiensi sistem pembakaran dan penggunaan bahan bakar yang lebih ramah lingkungan di sektor transportasi maupun industri.

Sebaliknya, PM_{10} memperlihatkan tingkat kesesuaian yang paling rendah dan fluktuatif. Pada awal periode pengamatan, hanya sekitar 20 hingga 45 persen hari yang memenuhi standar, dan sempat menurun tajam pada tahun 2019. Pola ini menunjukkan bahwa partikulat kasar masih menjadi masalah utama kualitas udara Jakarta yang sangat dipengaruhi oleh aktivitas transportasi, pembangunan infrastruktur, serta kondisi atmosfer kering yang memperlama keberadaan debu di udara. Polutan

NO_2 sempat menurun pada masa pandemi akibat berkurangnya emisi kendaraan, kemudian meningkat kembali setelah 2022, sedangkan O_3 cenderung meningkat setelah 2021 karena menurunnya emisi prekursor ozon seperti NO_x dan VOCs.



Gambar 9. Distribusi bulanan hari tidak sesuai terhadap standar WHO (2014–2024)

Pola musiman kesesuaian udara memperlihatkan bahwa proporsi hari tidak sesuai umumnya meningkat pada musim kemarau, khususnya pada bulan Juni hingga September. Kondisi udara yang kering dan curah hujan rendah memudahkan partikel debu serta polutan gas seperti NO_2 dan SO_2 bertahan di atmosfer lebih lama. Sebaliknya, pada musim hujan antara Desember hingga Februari, jumlah hari tidak sesuai berkurang karena curah hujan tinggi membantu proses pembersihan udara melalui deposisi basah.

Polutan O_3 menunjukkan kecenderungan berbeda, dengan peningkatan kadar pada bulan-bulan dengan penyinaran matahari lebih panjang seperti September hingga November. Fenomena ini sejalan dengan karakter ozon yang terbentuk melalui reaksi fotokimia di bawah radiasi matahari yang kuat. Sementara itu, CO menunjukkan konsentrasi yang relatif rendah di sepanjang tahun dengan sedikit peningkatan pada awal periode pengamatan. Secara keseluruhan, kualitas udara Jakarta masih sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan pola musim, di mana periode panas dan kering cenderung meningkatkan konsentrasi polutan dibandingkan periode basah.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan adanya hubungan yang signifikan antara faktor meteorologis dan tingkat kesesuaian harian polutan udara di Jakarta terhadap standar WHO 2021. Hasil uji Mann–Whitney U membuktikan bahwa suhu udara, kelembaban, curah hujan, dan lama penyinaran berpengaruh nyata terhadap perubahan konsentrasi polutan. Suhu dan penyinaran tinggi meningkatkan kadar ozon (O_3) dan karbon monoksida (CO), sedangkan kelembaban dan curah hujan menurunkan partikulat (PM_{10}), sulfur dioksida (SO_2), dan nitrogen dioksida (NO_2). Korelasi Spearman memperkuat hasil ini dengan menunjukkan hubungan positif antara suhu dan O_3 serta hubungan negatif antara kelembaban

dan polutan primer. Pola tersebut mengindikasikan bahwa kondisi panas dan kering memperburuk kualitas udara, sedangkan kondisi lembab dan hujan memperbaikinya.

Kelebihan penelitian ini terletak pada penerapan metode non-parametrik yang sesuai untuk data lingkungan yang tidak berdistribusi normal dan mengandung pencilan. Metode ini mampu menggambarkan pengaruh cuaca terhadap kualitas udara secara empiris dan stabil. Namun, penelitian masih terbatas pada analisis temporal di tingkat kota tanpa mempertimbangkan variasi spasial atau sumber emisi secara langsung.

Penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan menambahkan dimensi spasial serta menerapkan model statistik atau pembelajaran mesin untuk memperkirakan perubahan kualitas udara secara lebih akurat. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi perumusan kebijakan pengendalian polusi udara berbasis kondisi meteorologis di wilayah perkotaan tropis.

REFERENSI

- [1] United Nations Environment Programme, "About Air Pollution," UNEP Air Pollution Programme, 2024. [Online]. Available: <https://www.unep.org/explore-topics/air/about-air>
- [2] World Health Organization, "Ambient (outdoor) air pollution," *WHO Fact Sheet*, Sep. 2021. [Online]. Available: [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)
- [3] World Health Organization, WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide, Geneva: WHO, 2021. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [4] A. K. Baiduri, D. S. Prabowo, and R. T. Susanti, "Urban air pollution in Jakarta and its association with meteorological parameters," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 14, no. 6, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.101728>
- [5] Dinas Lingkungan Hidup Provinsi DKI Jakarta, Laporan Kualitas Udara DKI Jakarta 2023, Jakarta: DLH DKI, 2024. [Online]. Available: <https://lingkunganhidup.jakarta.go.id>
- [6] N. Azid et al., "The effects of meteorological factors on PM₁₀ concentrations in Malaysia: A case study in Kuala Lumpur," *Atmospheric Environment*, vol. 220, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117083>
- [7] Field Studies Council (UK), "Spearman's Rank Correlation and Mann-Whitney U Test," *Route to Enquiry: Data Analysis*, 2023. [Online]. Available: <https://www.field-studies-council.org/resources/16-18-geography/route-to-enquiry/data-analysis>
- [8] J. Sheskin, *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*, 6th ed., CRC Press, 2020.
- [9] M. Gauthier, "Detecting dependence between non-linear environmental variables using Spearman correlation," *Environmental Modelling & Software*, vol. 157, p. 105544, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105544>
- [10] E. C. Chatzidiakou, J. S. Barratt, and M. L. Williams, "Enhancing outlier detection in air quality index data using a stacked machine learning model," *Environmental Challenges*, vol. 1, p. 100017, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100017>
- [11] J. Han, J. Pei, and M. Kamber, *Data Mining: Concepts and Techniques*, 4th ed. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 2022.
- [12] X. Tian et al., "Research on Air Quality in Response to Meteorological Factors Based on the Informer Model," *Sustainability*, vol. 16, no. 16, p. 6794, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su16166794>
- [13] Anhar R. et al., "Integrated Analysis of Air Pollution and Meteorological Conditions in Jakarta," *Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 7, p. 5403, 2023. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37032334>
- [14] M. N. A. Huda, R. D. S. A. M. Fitriani, and N. S. P. Utami, "Determinants of PM_{2.5} Concentration in DKI Jakarta Province," *Jurnal Inferensi Statistik*, vol. 7, no. 2, pp. 67–75, 2023. [Online]. Available: <https://iptek.its.ac.id/index.php/inferensi/article/view/19843>
- [15] A. S. AlSalehy and M. Bailey, "Improving Time Series Data Quality: Identifying Outliers and Handling Missing Values in a Multilocation Gas and Weather Dataset," *Smart Cities*, vol. 8, no. 3, p. 82, 2025. Available: <https://doi.org/10.3390/smartcities8030082>
- [16] J. Parra-Plazas et al., "Time series outlier removal and imputing methods based on experimental weather data," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2023. Available: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27176-x>
- [17] K. Lubin, Updated WHO Air Quality Guidelines: Implications for the United States. Sacramento, CA: California Air Resources Board, May 2023. [Online]. Available: https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2023-06/Luben_AQGs%20Presentation%20May%202023.pdf
- [18] H. B. Mann and D. R. Whitney, "On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other," *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 18, no. 1, pp. 50–60, 1947. Available: <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>
- [19] J. Ruiz-Salmón, J. M. López-Pérez, and E. González-Rodelas, "Application of non-parametric tests to assess meteorological influences on air-pollution episodes," *Atmospheric Environment*, vol. 319, p. 120987, 2024. Available: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120987>
- [20] C. Spearman, "The Proof and Measurement of Association between Two Things," *The American Journal of Psychology*, vol. 15, pp. 72–101, 1904. Available: <https://doi.org/10.2307/1412159>
- [21] J. D. Evans, *Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences*, Pacific Grove, CA: Brooks/Cole, 1996.