KAMPUS AKADEMIK PUBLISING
Jurnal Multidisiplin Ilmu Akademik (JMIA)
Vol.3, No.6 Desember 2026
e-ISSN: 3032-7377, p-ISSN : 3032-7385, Hal 152-162
DOI : https://doi.org/10.61722/jmia.v3i6.13456

Perbandingan Metode ARIMA dan Holt-Winters dalam Peramalan Indeks Standar Pencemar Udara DKI Jakarta

Muhammad Rafli Adyatma[1], Mu'minatus Sakdiyah[2], Hamdan Billahil Ramadhan[3], Lidvina Apriliani Ota[4], Margareta Selestina Medho[5], Salsa Nabillah Ramadhany[6], Barnabas Wano Matatula[7]
Fakultas Teknologi Informasi Universitas Merdeka Malang
Alamat: Jalan Terusan Dieng. 62-64 Klojen, Pisang Candi, Kec. Sukun,
Kota Malang, Jawa Timur 65146
Korespondensi Penulis: 23083000157@student.unmer.ac.id

Abstract. *Urban air pollution directly impacts public health, making the forecasting of the Air Pollutant Standard Index (ISPU) crucial for early warning systems and emission control policies. This study aims to compare the predictive performance of the Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) and the additive Holt-Winters Exponential Smoothing models in projecting monthly ISPU values in DKI Jakarta up to the end of 2026. A 170-month historical dataset (2010–2021) obtained from Kaggle was analyzed using Minitab to generate forecasts for 22 forward periods (periods 171–192). The ARIMA(1,1,1) model produced a Mean Square of 13,209.2 with stable forecasts ranging from 616.469 to 671.872. In contrast, the additive Holt-Winters model (α = γ = δ = 0.2) yielded an MSD of 14,105.9, MAPE of 17.7%, and MAD of 89.1, exhibiting seasonal fluctuations between 523.679 and 800.437. Overall, ARIMA provided slightly lower forecast errors, although residual autocorrelation indicates the potential for further model refinement.*

Keywords: *ARIMA; DKI Jakarta; Forecasting; Holt-Winters; ISPU*

Abstrak. Pencemaran udara di kawasan perkotaan berdampak nyata pada kesehatan masyarakat, sehingga peramalan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) sangat esensial bagi peringatan dini dan mitigasi kebijakan emisi. Penelitian ini bertujuan membandingkan kinerja model Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) dan Holt-Winters Exponential Smoothing aditif dalam meramalkan nilai ISPU di DKI Jakarta hingga akhir tahun 2026. Data deret waktu bulanan sebanyak 170 observasi (periode 2010–2021) bersumber dari Kaggle dianalisis menggunakan perangkat lunak Minitab untuk memproyeksikan 22 periode ke depan (periode 171–192). Hasil evaluasi menunjukkan model ARIMA(1,1,1) menghasilkan Mean Square sebesar 13.209,2 dengan pola proyeksi stabil pada kisaran 616,469 hingga 671,872. Sementara itu, metode Holt-Winters aditif (α = γ = δ = 0,2) menghasilkan MSD sebesar 14.105,9, MAPE 17,7%, dan MAD 89,1 dengan proyeksi berosilasi musiman antara 523,679 dan 800,437. Model ARIMA memiliki akurasi galat sedikit lebih unggul dibandingkan Holt-Winters, meskipun residualnya masih menunjukkan dependensi temporal yang memerlukan pengembangan model musiman lanjutan.

Kata Kunci: ARIMA; DKI Jakarta; Holt-Winters; ISPU; Peramalan

PENDAHULUAN

Pencemaran udara merupakan salah satu tantangan lingkungan hidup global paling mendesak yang memiliki implikasi langsung dan multidimensional terhadap derajat kesehatan masyarakat serta keberlanjutan kualitas hidup di wilayah perkotaan. Berbagai kajian epidemiologi kontemporer menegaskan bahwa paparan jangka pendek maupun jangka panjang terhadap polutan udara ambien, khususnya partikulat halus (PM10 dan PM2.5), nitrogen dioksida (NO2), sulfur dioksida (SO2), karbon monoksida (CO), dan ozon (O3), berkaitan erat dengan peningkatan risiko morbiditas serta mortalitas kardiorespirasi pada populasi urban (Southerland et al., 2022; World Health Organization, 2021). Di Indonesia, intensitas degradasi kualitas udara paling nyata dirasakan di kawasan aglomerasi metropolitan dengan kepadatan demografis yang tinggi, volume kendaraan bermotor yang masif, dan konsentrasi kegiatan industri yang pesat.

Naskah Masuk: 04 November 2026; Revisi: 05 November 2026; Diterima: 06 November 2026; Terbit: 19 November 2026

Provinsi DKI Jakarta sebagai pusat aglomerasi ekonomi dan kegiatan nasional dengan mobilitas jutaan kendaraan bermotor setiap hari kerap menghadapi permasalahan degradasi mutu udara yang persisten. Beban emisi antropogenik yang tinggi berinteraksi dengan dinamika meteorologi lokal tropis, kerap menempatkan Jakarta pada jajaran kota dengan kualitas udara terburuk di kawasan regional maupun dunia (Handhayani, 2023; IQAir, 2023). Dalam kerangka pengelolaan dan pemantauan mutu lingkungan di Indonesia, kondisi udara ambien dinyatakan melalui Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2020). ISPU berfungsi mengonversi konsentrasi berbagai parameter polutan menjadi angka tunggal terstandarisasi yang merefleksikan tingkat risiko kesehatan manusia dan kelestarian ekosistem (Agista et al., 2020; Nelvidawati & Roza, 2022). Publikasi nilai ISPU secara berkala membentuk data deret waktu (time series) historis yang merefleksikan dinamika mutu udara masa lalu dan membuka peluang untuk memproyeksikan polusi di masa depan.

Peramalan deret waktu ISPU memiliki peranan yang sangat strategis bagi tata kelola lingkungan dan pengambilan kebijakan publik. Prediksi yang akurat memungkinkan pemerintah daerah merumuskan intervensi pengendalian emisi secara preventif, memberikan peringatan dini kepada masyarakat rentan, serta menyusun skema mitigasi darurat sebelum konsentrasi polutan mencapai level berbahaya. Pada prinsipnya, pemodelan deret waktu memanfaatkan struktur data historis, seperti tren sekuler jangka panjang, variasi musiman berulang, dan struktur keterkaitan autokorelasi stokastik antarwaktu, guna memproyeksikan lintasan indikator lingkungan di masa depan (Hyndman & Athanasopoulos, 2021; Mani et al., 2022; Perdana & Muklason, 2023). Di antara spektrum metodologi statistik yang tersedia, metode Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) dan Holt-Winters Exponential Smoothing merupakan dua instrumen peramalan parametrik klasik yang paling mapan dan luas diimplementasikan.

Kedua pendekatan peramalan tersebut dibangun di atas landasan teoretis yang berbeda secara fundamental. Metodologi ARIMA Box-Jenkins memodelkan deret waktu univariat melalui kombinasi komponen autoregresif (AR), diferensiasi (I) untuk mewujudkan kestasioneran ragam dan rata-rata, serta rataan bergerak (MA) dari residual galat masa lalu (Box et al., 2015; Mushliha & Nisrinah, 2026). Sebaliknya, metode Holt-Winters merupakan pengembangan dari pemulusan eksponensial yang secara adaptif memperhitungkan tiga komponen sekaligus secara rekursif, yaitu komponen level dasar, tren perubahan lokal, dan komponen musiman berulang (Muna & Kuntoro, 2021; Nurhamidah et al., 2020; Sabrina et al., 2023; Winters, 1960). ARIMA bertumpu pada identifikasi fungsi autokorelasi dan kestasioneran stokastik, sedangkan Holt-Winters mengandalkan sistem pembobotan eksponensial terdistribusi terhadap observasi terkini dengan parameter musiman eksplisit (Jayanth et al., 2025; Rumini & Norhikmah, 2020).

Kesenjangan antara kondisi ideal yang diharapkan (das sollen) dan kondisi empiris yang teramati (das sein) terletak pada kenyataan bahwa tidak ada satu metode peramalan yang bersifat superior secara universal untuk seluruh variasi data kualitas udara perkotaan. Dinamika polusi udara di DKI Jakarta sangat volatil dan dipengaruhi oleh transisi musim kemarau dan penghujan yang ekstrem, sehingga performa peramalan sangat bergantung pada kemampuan model dalam mengakomodasi fluktuasi lokal tanpa kehilangan akurasi jangka panjang (Chicco et al., 2021; Firdaus et al., 2026; Kurniawan et al., 2024). Meskipun berbagai studi peramalan mutakhir telah mengeksplorasi algoritma pembelajaran mesin kompleks (Perdana & Muklason, 2023), pengujian komparasi yang mendalam dan rigor antara model parametrik ARIMA dan Holt-Winters aditif pada deret waktu jangka panjang ISPU DKI Jakarta tetap menjadi landasan ilmiah esensial guna

menetapkan model acuan dasar yang terpercaya. Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja model ARIMA dan Holt-Winters Exponential Smoothing aditif dalam meramalkan ISPU di DKI Jakarta untuk 22 periode ke depan (periode 171 hingga 192) hingga akhir tahun 2026 dengan menggunakan perangkat lunak Minitab, serta mengidentifikasi metode yang menghasilkan galat peramalan minimum berdasarkan ukuran kesalahan Mean Absolute Percentage Error (MAPE), Mean Absolute Deviation (MAD), Mean Squared Deviation (MSD), dan Mean Square (MS).

KAJIAN TEORI

Pemantauan kualitas udara ambien di Indonesia mengacu pada regulasi baku mutu lingkungan yang dioperasionalisasikan melalui Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU). Berdasarkan Peraturan Menteri LHK Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020, penetapan ISPU dihitung berdasarkan tujuh parameter pencemar utama, yaitu partikulat PM10 dan PM2.5, karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO2), nitrogen dioksida (NO2), ozon permukaan (O3), dan hidrokarbon (HC) (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2020). Nilai indeks diklasifikasikan ke dalam kategori kesehatan: baik (0–50), sedang (51–100), tidak sehat (101–200), sangat tidak sehat (201–300), dan berbahaya (> 300). Data ISPU yang dihimpun secara berkala membentuk rangkaian deret waktu kontinu yang memperlihatkan karakteristik musiman yang kuat akibat pengaruh monsun barat dan timur di Indonesia (Agista et al., 2020; Nelvidawati & Roza, 2022).

Metode pemulusan eksponensial Holt-Winters dirancang secara spesifik untuk menangani deret waktu yang memperlihatkan kecenderungan tren dan variasi musiman berulang (Jayanth et al., 2025; Nurhamidah et al., 2020; Sabrina et al., 2023; Winters, 1960). Pendekatan ini memperbarui estimasi level rata-rata, laju tren linear, dan faktor musiman secara berkelanjutan melalui sistem pembobotan eksponensial di mana observasi terbaru memperoleh bobot terbesar. Terdapat dua spesifikasi model Holt-Winters, yaitu model multiplikatif dan model aditif. Pada penelitian ini diaplikasikan model Holt-Winters aditif, yang relevan ketika amplitudo fluktuasi musiman bernilai relatif konstan dan independen terhadap besaran level absolut data (Muna & Kuntoro, 2021; Nurhamidah et al., 2020). Struktur matematis Holt-Winters aditif didefinisikan melalui persamaan rekursif komponen pemulusan level, tren, musiman, dan formula peramalan sebagai berikut:

$$Lt = \alpha(Yt - St - p) + (1 - \alpha)(Lt - 1 + Tt - 1)$$
$$Tt = \gamma(Lt - Lt - 1) + (1 - \gamma)Tt - 1$$
$$St = \delta(Yt - Lt) + (1 - \delta)St - p$$
$$Ft + m = Lt + m \cdot Tt + St - p + m$$

Dalam formulasi di atas, Yt melambangkan nilai observasi aktual pada periode t, Lt adalah komponen level, Tt merupakan komponen tren, St menyatakan komponen musiman, p adalah panjang siklus periode musiman, dan m adalah jumlah horizon langkah periode ke depan yang diramalkan. Konstanta pemulusan level (α), tren (γ), dan musiman (δ) bernilai riil pada interval tertutup 0 hingga 1. Semakin mendekati nilai satu, model memberikan bobot yang semakin dominan terhadap pengamatan paling mutakhir (Muna & Kuntoro, 2021).

Model Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) merupakan kelas model stokastik linier Box-Jenkins yang sangat efektif dalam memodelkan deret waktu univariat yang stasioner maupun yang dapat distasionerkan melalui proses diferensiasi (Box et al., 2015;

Montgomery et al., 2021). Model ARIMA dilambangkan dengan notasi ARIMA(p,d,q), dengan p menyatakan orde autoregresif (AR) di mana nilai amatan periode kini dipengaruhi oleh amatan periode sebelumnya; d menyatakan derajat diferensiasi yang diterapkan guna mengeliminasi non-kestasioneran rata-rata; dan q mencerminkan orde rataan bergerak (MA) di mana nilai amatan saat ini dimodelkan sebagai kombinasi linier galat residual masa lampau (Mani et al., 2022; Mushliha & Nisrinah, 2026). Prosedur pemodelan Box-Jenkins dilaksanakan melalui empat tahapan terpadu: a. identifikasi kestasioneran dan orde model via plot Autocorrelation Function (ACF) serta Partial Autocorrelation Function (PACF); b. estimasi parameter koefisien model; c. pemeriksaan diagnostik kelayakan residual melalui uji Ljung-Box guna memverifikasi apakah residual berdistribusi acak (white noise); dan d. penerapan model terpilih untuk proyeksi peramalan ke depan (Rumini & Norhikmah, 2020).

Evaluasi dan seleksi kinerja peramalan komparatif antar kedua metode dilakukan dengan memanfaatkan sejumlah metrik ukuran kesalahan standar (Chicco et al., 2021; Hodson, 2022). Kriteria evaluasi tersebut mencakup: a. Mean Absolute Percentage Error (MAPE), yang merepresentasikan rata-rata persentase deviasi mutlak ramalan terhadap data aktual; b. Mean Absolute Deviation (MAD), yang mengukur rata-rata magnitudo deviasi absolut; c. Mean Squared Deviation (MSD), yang menghitung rata-rata kuadrat deviasi residual amatan; serta d. Mean Square (MS), yang diperoleh dari pembagian jumlah kuadrat residual dengan derajat bebas pada estimasi ARIMA di Minitab. Semakin kecil nilai metrik kesalahan tersebut, semakin tinggi tingkat presisi model yang dihasilkan. Berbagai penelitian empiris terdahulu, seperti telaah Muna dan Kuntoro (2021) terhadap ISPU Surabaya, evaluasi performa ARIMA oleh Kurniawan et al. (2024), peramalan ISPU DKI Jakarta oleh Sabrina et al. (2023), telaah komparasi oleh Anwar dan Rassiyanti (2025), serta Rumini dan Norhikmah (2020), memperlihatkan bahwa kinerja relatif antara ARIMA dan pemulusan eksponensial sangat tergantung pada sensitivitas model terhadap pola autokorelasi musiman dan persistensi fluktuasi data.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan deskriptif analitis berbasis pemodelan deret waktu (time series forecasting) guna membandingkan akurasi dan karakteristik proyeksi antara model ARIMA dan model Holt-Winters Exponential Smoothing aditif pada data Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) di Provinsi DKI Jakarta. Data sekunder yang dianalisis bersumber dari repositori publik Kaggle (Senadu, 2021), yang memuat data deret waktu bulanan ISPU DKI Jakarta selama kurun waktu tahun 2010 hingga 2021 dengan total amatan sebanyak 170 observasi berurutan. Seluruh proses manipulasi data, estimasi parameter model, uji diagnostik, dan komputasi peramalan dieksekusi secara komprehensif menggunakan perangkat lunak Minitab melalui tiga tahapan analisis sistematis, yaitu: a. pemodelan deret waktu menggunakan metode Holt-Winters Exponential Smoothing aditif dengan menetapkan parameter pemulusan level, tren, dan musiman sebesar $\alpha = \gamma = \delta = 0{,}2$; b. pemodelan stokastik ARIMA melalui prosedur identifikasi diferensiasi orde kestasioneran, penaksiran koefisien parameter melalui proses iterasi kuadrat terkecil nonlinier, serta pengujian diagnostik keacakan residual menggunakan uji Ljung-Box; dan c. ekstrapolasi peramalan out-of-sample sepanjang 22 periode ke depan (periode 171 hingga 192) yang merepresentasikan proyeksi bulanan hingga akhir tahun 2026. Selanjutnya, evaluasi performa kedua metode dinilai secara komparatif berdasarkan metrik ukuran kesalahan peramalan yang mencakup Mean Absolute Percentage Error (MAPE), Mean Absolute Deviation (MAD), Mean Squared Deviation (MSD), dan Mean Square (MS) residual guna menetapkan rekomendasi model peramalan kualitas udara yang paling optimal.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Analisis hasil penelitian dan pembahasan ini menyajikan uraian komparatif komprehensif mengenai hasil pemodelan deret waktu ISPU DKI Jakarta menggunakan metode Holt-Winters Exponential Smoothing aditif dan ARIMA(1,1,1), yang mencakup estimasi parameter, evaluasi diagnostik galat, pola trayek peramalan 22 periode ke depan, serta pembahasan teoretis mengenai implikasi lingkungan dari temuan tersebut.

Hasil Pemodelan dan Peramalan Holt-Winters

Pemodelan deret waktu ISPU DKI Jakarta dengan metode Holt-Winters aditif dioperasikan dengan menerapkan konstanta pemulusan empiris sebesar α (level) = 0,2, γ (tren) = 0,2, dan δ (musiman) = 0,2. Pemilihan nilai parameter ini memberikan keseimbangan yang memadai antara penyesuaian adaptif terhadap fluktuasi jangka pendek terkini dan stabilitas historis jangka panjang. Rangkuman ukuran kesalahan peramalan yang dihasilkan dari pemodelan Holt-Winters aditif disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ukuran Kesalahan Peramalan Metode Holt-Winters Aditif

Ukuran Kesalahan	Nilai Evaluasi
Mean Absolute Percentage Error (MAPE)	17,7%
Mean Absolute Deviation (MAD)	89,1
Mean Squared Deviation (MSD)	14.105,9

Berdasarkan Tabel 1, perolehan nilai MAPE sebesar 17,7% mengindikasikan bahwa rata-rata simpangan absolut peramalan model berada di kisaran 17,7% dari data aktual, yang tergolong dalam kategori akurasi peramalan yang baik. Nilai MAD sebesar 89,1 dan MSD sebesar 14.105,9 merefleksikan dispersi galat pemodelan terhadap variasi deret waktu historis. Dalam aspek pola peramalan 22 periode ke depan (periode 171 hingga 192), metode Holt-Winters aditif menghasilkan lintasan ramalan yang berosilasi secara periodik mengikuti siklus musiman tahunan. Dinamika lintasan ramalan tersebut secara spesifik dicirikan oleh beberapa fenomena penting: a. nilai ramalan meningkat sejak awal periode proyeksi dari 661,887 pada periode 171 hingga mencapai titik puncak tertinggi sebesar 800,437 pada periode 175; b. setelah melampaui puncak, proyeksi mengalami tren penurunan periodik hingga menyentuh titik terendah peramalan pada periode 192 dengan angka 523,679; dan c. keseluruhan lintasan ramalan bergerak dinamis dalam interval 523,679 sampai 800,437, yang membuktikan kemampuan model dalam menangkap dekomposisi komponen musiman.

Analisis selang prediksi pada tingkat kepercayaan 95% memperlihatkan rentang batas yang cukup lebar. Pada periode awal peramalan (periode 171), selang prediksi berada pada rentang 443,582 hingga 880,190, dan kemudian semakin melebar secara signifikan seiring bertambahnya horizon waktu peramalan hingga mencapai batas 175,254 sampai 872,100 pada periode 192. Pelebaran selang ini mengindikasikan eskalasi ketidakpastian proyeksi untuk jangka menengah hingga panjang. Pemeriksaan grafis plot deret waktu menunjukkan bahwa pada data historis terjadi anomali penurunan kualitas udara yang sangat tajam ke kisaran indeks 150 hingga 200 pada periode tertentu. Penurunan ekstrem yang bersifat temporer tersebut tidak dapat sepenuhnya

diikuti oleh garis nilai kecocokan (fits) model Holt-Winters, yang menjadi faktor penjelas mengapa nilai galat kuadrat MSD tetap bertahan pada angka 14.105,9.

Hasil Pemodelan dan Peramalan ARIMA

Pemodelan stokastik Box-Jenkins pada data deret waktu ISPU DKI Jakarta menghasilkan spesifikasi model terbaik ARIMA(1,1,1). Proses estimasi parameter melalui algoritma kuadrat terkecil nonlinier di Minitab mencapai konvergensi pada iterasi ke-12 dengan nilai Sum of Squared Errors (SSE) akhir sebesar 2.205.119, di mana reduksi jumlah kuadrat galat tidak lagi mengalami penurunan signifikan. Rincian estimasi koefisien parameter ARIMA(1,1,1) disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Estimasi Akhir Parameter Model ARIMA(1,1,1)

Tipe Parameter	Koefisien	SE Koefisien	T-Value	P-Value
AR(1)	0,5899	0,0654	9,02	0,000
MA(1)	0,98110	0,00512	191,74	0,000
Konstanta	0,148	0,292	0,51	0,613

Hasil estimasi pada Tabel 2 menunjukkan bahwa koefisien parameter autoregresif AR(1) sebesar 0,5899 dan parameter rataan bergerak MA(1) sebesar 0,98110 memiliki nilai signifikansi statistik yang sangat kuat dengan p-value sebesar 0,000 (jauh di bawah taraf signifikansi $\alpha = 0{,}05$). Sebaliknya, parameter konstanta bernilai 0,148 terbukti tidak signifikan secara statistik dengan p-value sebesar 0,613 (> 0,05), yang mengindikasikan bahwa konstanta tidak memberikan kontribusi signifikan terhadap struktur pemodelan. Mengacu pada konvensi formulasi persamaan deret waktu di Minitab, model ARIMA(1,1,1) yang terbentuk dapat diekspresikan menggunakan operator mundur (backshift operator B) sebagai berikut:

$$(1 - 0{,}5899B)(1 - B)Yt = 0{,}148 + (1 - 0{,}9811B)at$$

Persamaan di atas dapat ditransformasikan ke dalam representasi ekspansi aljabar eksplisit untuk peramalan nilai amatan kini (Yt) sebagai berikut:

$$Yt = Yt - 1 + 0{,}5899(Yt - 1 - Yt - 2) + 0{,}148 + at - 0{,}9811at - 1$$

di mana Yt menyatakan nilai amatan pada waktu t, dan at melambangkan galat residual acak pada periode t. Evaluasi terhadap variansi residual model menghasilkan nilai derajat bebas (degree of freedom/DF) sebesar 166, jumlah kuadrat residual (Sum of Squares/SS) sebesar 2.192.730, dan nilai Mean Square (MS) sebesar 13.209,2. Nilai MS ini berfungsi sebagai indikator utama evaluasi galat residual model ARIMA. Untuk menguji apakah asumsi keacakan residual (white noise) terpenuhi, dilakukan pemeriksaan diagnostik uji Ljung-Box pada berbagai lag temporal, sebagaimana tertera pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Diagnostik Residual Ljung-Box Model ARIMA(1,1,1)

Parameter Pengujian	Lag 12	Lag 24	Lag 36	Lag 48
Statistik Chi-Square	26,09	36,97	65,24	81,52
Derajat Bebas (DF)	9	21	33	45

P-Value	0,002	0,017	0,001	0,001

Hasil uji Ljung-Box pada Tabel 3 menunjukkan bahwa seluruh nilai p-value pada lag 12 (0,002), lag 24 (0,017), lag 36 (0,001), dan lag 48 (0,001) berada secara konsisten di bawah ambang batas signifikansi 0,05. Temuan empiris ini menolak hipotesis nol residual acak dan membuktikan bahwa residual ARIMA(1,1,1) masih mengandung korelasi serial (autokorelasi) yang belum sepenuhnya terekstraksi oleh komponen AR dan MA non-musiman. Hal ini mengonfirmasi bahwa model ARIMA(1,1,1) standar belum optimal sepenuhnya, sehingga membuka ruang perbaikan melalui penambahan orde musiman (SARIMA) pada penelitian lanjutan. Terkait trayek ramalan, nilai proyeksi ARIMA(1,1,1) diawali pada angka 616,469 pada periode 171, kemudian naik secara gradual menuju 659,948 pada periode 175, dan mengalami stabilisasi konvergen mendekati garis datar pada kisaran 667,129 (periode 180) hingga berakhir di 671,872 pada periode 192. Selang prediksi 95% model ARIMA pada periode 171 berada pada rentang 391,158 hingga 841,779, dan melebar menjadi 381,868 hingga 961,876 pada periode 192. Sifat lintasan yang cenderung konvergen menuju nilai rata-rata ini memperlihatkan sifat alamiah model ARIMA terintegrasi yang berorientasi pada kestabilan mean jangka panjang dan tidak merespons osilasi musiman periodik.

Perbandingan Kinerja dan Pembahasan Model

Perbandingan langsung proyeksi peramalan ISPU DKI Jakarta selama 22 periode ke depan (periode 171 hingga 192) antara model ARIMA(1,1,1) dan model Holt-Winters aditif disajikan secara komparatif pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Hasil Ramalan ISPU DKI Jakarta Periode 171–192

Periode Proyeksi	Hasil Ramalan ARIMA(1,1,1)	Hasil Ramalan Holt-Winters Aditif
171	616,469	661,887
172	636,444	698,461
173	648,375	774,223
174	655,561	770,210
175	659,948	800,437
176	662,683	787,109
177	664,445	771,340
178	665,632	769,089
179	666,481	654,047
180	667,129	565,755
181	667,660	527,607
182	668,120	543,115

183	668,540	619,811
184	668,936	656,386
185	669,317	732,147
186	669,690	728,134
187	670,058	758,362
188	670,423	745,033
189	670,787	729,264
190	671,149	727,014
191	671,510	611,971
192	671,872	523,679

Untuk memberikan tinjauan menyeluruh terhadap performa kedua pendekatan pemodelan, ringkasan perbandingan komparatif dari segi struktur parameter, magnitudo kesalahan, rentang nilai ramalan, serta karakteristik lintasan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Ringkasan Perbandingan Kinerja Metode ARIMA(1,1,1) dan Holt-Winters Aditif

Aspek Evaluasi	Model ARIMA(1,1,1)	Metode Holt-Winters Aditif
Struktur Parameter	$p = 1, d = 1, q = 1$	$\alpha = \gamma = \delta = 0{,}2$
Ukuran Kesalahan	MS = 13.209,2	MSD = 14.105,9 (MAPE 17,7%; MAD 89,1)
Kisaran Nilai Ramalan	616,469 – 671,872	523,679 – 800,437
Karakteristik Lintasan	Stabil konvergen menuju rerata	Berfluktuasi siklikal mengikuti musiman

Pembahasan mendalam terhadap temuan empiris pada Tabel 4 dan Tabel 5 mengungkap distingsi perilaku matematis mendasar antara model stokastik ARIMA dan model pemulusan eksponensial Holt-Winters. Dari perspektif besaran kesalahan pemodelan, ARIMA(1,1,1) menghasilkan nilai Mean Square sebesar 13.209,2, sedikit lebih rendah jika dibandingkan dengan MSD Holt-Winters aditif sebesar 14.105,9. Namun demikian, secara metodologis perlu dicermati bahwa metrik MS pada ARIMA dihitung dengan membagi jumlah kuadrat residual terhadap derajat bebas model (DF = 166), sedangkan MSD pada metode pemulusan Holt-Winters dihitung dengan membagi jumlah kuadrat terhadap total observasi sampel (N = 170). Oleh sebab itu, perbandingan langsung antar kedua ukuran ini memiliki sifat pendekatan komparatif, di mana model ARIMA memperlihatkan keunggulan marjinal dalam meredam dispersi variansi galat secara umum.

Di sisi lain, perbandingan visual dan numerik lintasan proyeksi memperlihatkan perbedaan karakteristik yang sangat tajam dan bernilai praktis bagi tata kelola kualitas udara perkotaan. Model Holt-Winters aditif menunjukkan kepekaan tinggi dalam mereproduksi pola siklus musiman polusi udara DKI Jakarta. Di wilayah tropis seperti Jakarta, akumulasi polutan

cenderung memuncak pada musim kemarau akibat minimnya curah hujan pencuci udara (wet deposition) serta fenomena inversi suhu permukaan, dan kemudian menurun drastis pada puncak musim hujan (Handhayani, 2023). Holt-Winters secara eksplisit menangkap siklus tersebut, sebagaimana ditunjukkan oleh proyeksi puncak ISPU sebesar 800,437 pada periode 175 dan titik terendah 523,679 pada periode 192. Kemampuan memprediksi titik ekstrem musiman ini sangat bernilai bagi otoritas lingkungan dalam mempersiapkan langkah siaga darurat emisi dan pengawasan industri secara musiman.

Sebaliknya, model ARIMA(1,1,1) menghasilkan kurva proyeksi yang bergerak konvergen menuju nilai rata-rata data historis pada rentang sempit 616,469 hingga 671,872. Model ini sangat cocok berfungsi sebagai estimasi dasar (baseline benchmark) kualitas udara jangka panjang yang stabil tanpa terdistorsi oleh fluktuasi acak sementara. Akan tetapi, ketiadaan parameter musiman menyebabkan ARIMA(1,1,1) gagal menangkap puncak dan lembah osilasi atmosfer tahunan. Fakta ini diperkuat oleh hasil uji diagnostik Ljung-Box yang menunjukkan residual ARIMA belum bersifat white noise, menandakan adanya dinamika musiman terabaikan yang berpotensi besar diatasi melalui penerapan model Seasonal ARIMA (SARIMA) atau model hibrida modern seperti ARIMA-LSTM (Jayanth et al., 2025; Kurniawan et al., 2024; Mushliha & Nisrinah, 2026; Perdana & Muklason, 2023).

KESIMPULAN

Penelitian komparasi peramalan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) di Provinsi DKI Jakarta untuk 22 periode ke depan (hingga akhir tahun 2026) berdasarkan data historis bulanan periode 2010–2021 membuktikan bahwa model ARIMA(1,1,1) dan metode Holt-Winters Exponential Smoothing aditif menghasilkan karakteristik proyeksi yang berbeda sesuai dengan arsitektur matematis masing-masing. Model ARIMA(1,1,1) menghasilkan lintasan proyeksi yang cenderung stabil dan mendatar pada kisaran nilai 616,469 hingga 671,872 dengan galat pemodelan yang sedikit lebih rendah (Mean Square sebesar 13.209,2), sementara metode Holt-Winters aditif ($\alpha = \gamma = \delta = 0{,}2$) secara adaptif mampu menangkap osilasi musiman dengan proyeksi yang berfluktuasi siklikal pada rentang 523,679 hingga 800,437 dengan capaian MSD sebesar 14.105,9, MAPE sebesar 17,7%, dan MAD sebesar 89,1. Meskipun ARIMA menunjukkan akurasi kesalahan yang sedikit lebih unggul, hasil diagnostik uji Ljung-Box membuktikan bahwa residual model ARIMA masih mengandung autokorelasi serial yang signifikan ($p < 0{,}05$), sehingga model belum beroperasi secara optimal dan memerlukan perbaikan. Dengan demikian, untuk keperluan praktis manajemen lingkungan yang membutuhkan antisipasi lonjakan ekstrem musiman disarankan mengacu pada dinamika Holt-Winters, sedangkan bagi penelitian selanjutnya disarankan mengembangkan model musiman Seasonal ARIMA (SARIMA), melakukan optimasi konstanta pemulusan Holt-Winters, serta mengeksplorasi model hibrida cerdas guna menghasilkan peramalan kualitas udara perkotaan yang bebas autokorelasi dan berdaya presisi tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

Agista, P., Gusdini, N., & Maharani, M. (2020). Analisis kualitas udara dengan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) dan sebaran kadar polutannya di Provinsi DKI Jakarta. *Sustainable Environmental and Optimizing Industry Journal*, *2*(2), 39–57. https://doi.org/10.36441/seoi.v2i2.491

Anwar, R., & Rassiyanti, L. (2025). Analisis komparasi model peramalan Prophet dan ARIMA dalam memprediksi harga saham penutupan PT ANTM. *Lattice Journal: Journal of Mathematics Education and Applied*, *5*(1), 57–74. https://doi.org/10.30983/lattice.v5i1.9478

Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control* (5th ed.). John Wiley & Sons.

Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, *7*, e623. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623

Firdaus, F., Komaro, M., & Dwiyanti, V. (2026). Perbandingan metode Holt-Winters dan SARIMA untuk memprediksi permintaan produk fashion pada PT XYZ. *Jurnal Industri, Manajemen dan Rekayasa Sistem Industri*, *4*(2), 140–152. https://doi.org/10.56211/factory.v4i2.1401

Handhayani, T. (2023). An integrated analysis of air pollution and meteorological conditions in Jakarta. *Scientific Reports*, *13*(1), 5896. https://doi.org/10.1038/s41598-023-32817-9

Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not, and what to substitute. *Geoscientific Model Development*, *15*(14), 5481–5487. https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022

Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: Principles and practice* (3rd ed.). OTexts: Melbourne, Australia. https://otexts.com/fpp3/

IQAir. (2023). *World air quality report 2023: Region & city PM2.5 ranking*. IQAir. https://www.iqair.com/world-air-quality-report

Jayanth, T., Manimaran, A., Reddy, V., & Rajashekar, N. (2025). Enhancing air quality prediction through Holt–Winters smoothing and Transformer-BiGRU with Bayesian optimization. *IEEE Access*, *13*, 180756–180780. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3621231

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2020). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.

Kurniawan, J. D., Parhusip, H. A., & Trihandaru, S. (2024). Predictive performance evaluation of ARIMA and hybrid ARIMA-LSTM models for particulate matter concentration. *Jurnal Online Informatika*, *9*(2), 259–268. https://doi.org/10.15575/join.v9i2.1318

Mani, G., Viswanadhapalli, J. K., & Stonier, A. A. (2022). Prediction and forecasting of air quality index in Chennai using regression and ARIMA time series models. *Journal of Engineering Research*, *10*(2), 179–194. https://doi.org/10.36909/jer.10253

Montgomery, D. C., Jennings, C. L., & Kulahci, M. (2021). *Introduction to time series analysis and forecasting* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Muna, S., & Kuntoro, K. (2021). Application of the Holt-Winters exponential smoothing method on the Air Pollution Standard Index in Surabaya. *Jurnal Biometrika dan Kependudukan*, *10*(1), 53–60. https://doi.org/10.20473/jbk.v10i1.2021.53-60

Mushliha, M., & Nisrinah, N. (2026). Evaluation of ARIMA, ARIMA-LSTM, LSTM, and CNN-LSTM models for daily air quality index forecasting in Jakarta. *IDEALIS: InDonEsiA Journal Information System*, *9*(2), 214–223. https://doi.org/10.36080/idealis.v9i2.3799

Nelvidawati, N., & Roza, A. (2022). Perbandingan nilai ISPU harian di 5 titik pemantauan udara DKI Jakarta pada saat lockdown Maret 2020. *Construction and Material Journal*, *4*(1), 23–30. https://doi.org/10.32722/cmj.v4i1.4520

Nurhamidah, N., Nusyirwan, N., & Faisol, A. (2020). Forecasting seasonal time series data using the Holt-Winters exponential smoothing method of additive models. *Jurnal Matematika Integratif*, *16*(2), 151–157. https://doi.org/10.24198/jmi.v16.n2.29293.151-157

Perdana, D., & Muklason, A. (2023). Machine learning untuk peramalan kualitas Indeks Standar Pencemar Udara DKI Jakarta dengan metode hibrid ARIMAX-LSTM. *ILKOMNIKA: Journal of Computer Science and Applied Informatics*, *5*(3), 209–222. https://doi.org/10.28926/ilkomnika.v5i3.588

Rumini, R., & Norhikmah, N. (2020). Perbandingan metode ARIMA dan exponential smoothing Holt-Winters untuk peramalan data kunjungan. *SISTEMASI: Jurnal Sistem Informasi*, *9*(3), 622–631. https://doi.org/10.32520/stmsi.v9i3.975

Sabrina, D. A., Pratiwi, H., & Respatiwulan. (2023). Dashboard visualization and forecasting of the air pollutant standard index (ISPU) in DKI Jakarta using the holt-winter triple exponential smoothing method. *AIP Conference Proceedings*, *2738*(1), 050017. https://doi.org/10.1063/5.0148306

Senadu. (2021). *Air quality index in Jakarta 2010–2021* [Data set]. Kaggle. https://www.kaggle.com/datasets/senadu34/air-quality-index-in-jakarta-2010-2021

Southerland, V. A., Brauer, M., Mohegh, A., Hammer, M. S., van Donkelaar, A., Martin, R. V., Apte, J. S., & Anenberg, S. C. (2022). Global urban temporal trends in fine particulate matter (PM2·5) and attributable health burdens: Estimates from global datasets. *The Lancet Planetary Health*, *6*(2), e139–e146. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00350-8

Winters, P. R. (1960). Forecasting sales by exponentially weighted moving averages. *Management Science*, *6*(3), 324–342. https://doi.org/10.1287/mnsc.6.3.324

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. https://iris.who.int/handle/10665/345329