

**PERAMALAN KONSENTRASI $PM_{2.5}$ DI KOTA MEDAN
MENGUNAKAN METODE ARIMAX DENGAN FAKTOR
METEOROLOGI SEBAGAI VARIABEL EKSOGEN**



**Oleh
FAUZAN ARRAHMAN
NIM. 21337074**

**PROGRAM STUDI SARJANA STATISTIKA
DEPARTEMEN STATISTIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2025**

**PERAMALAN KONSENTRASI PM_{2.5} DI KOTA MEDAN
MENGUNAKAN METODE ARIMAX DENGAN FAKTOR
METEOROLOGI SEBAGAI VARIABEL EKSOGEN**

SKRIPSI

*Diajukan sebagai salah satu persyaratan guna memperoleh gelar
Sarjana Statistika*



**Oleh
FAUZAN ARRAHMAN
NIM. 21337074**

**PROGRAM STUDI SARJANA STATISTIKA
DEPARTEMEN STATISTIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2025**

PERSETUJUAN SKRIPSI

PERAMALAN KONSENTRASI $PM_{2.5}$ DI KOTA MEDAN MENGUNAKAN METODE ARIMAX DENGAN FAKTOR METEOROLOGI SEBAGAI VARIABEL EKSOGEN

Nama : Fauzan Arrahman
NIM : 21337074
Program Studi : S1 Statistika
Jurusan : Statistika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Mengetahui:
Kepala Departemen Statistika



Dr. Yenni Kurniawati, S.Si., M.Si
NIP. 198402232010122005

Padang, 29 Oktober 2025

Disetujui Oleh:
Pembimbing



Tessy Octavia Mukhti, M.Stat.
NIP. 199610312022032011

PENGESAHAN LULUS UJIAN SKRIPSI

Nama : Fauzan Arrahman
NIM : 21337074
Program Studi : S1 Statistika
Jurusan : Statistika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

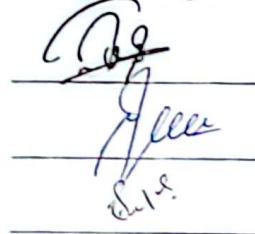
PERAMALAN KONSENTRASI $PM_{2.5}$ DI KOTA MEDAN MENGUNAKAN METODE ARIMAX DENGAN FAKTOR METEOROLOGI SEBAGAI VARIABEL EKSOGEN

Dinyatakan lulus setelah dipertahankan di depan Tim Penguji Skripsi
Departemen Statistika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Padang

Padang, 29 Oktober 2025

Tim Penguji	Nama
Ketua	: Tessy Octavia Mukhti, M.Stat.
Anggota	: Dr. Dony Permana, M.Si.
Anggota	: Fenni Kurnia Mutiya, M.Stat.

Tanda Tangan



SURAT PERNYATAAN TIDAK PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Fauzan Arrahman
NIM : 21337074
Program Studi : S1 Statistika
Jurusan : Statistika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Dengan ini menyatakan bahwa, skripsi saya dengan judul **“Peramalan Konsentrasi PM_{2.5} Di Kota Medan Menggunakan Metode ARIMAX Dengan Faktor Meteorologi Sebagai Variabel Eksogen”** Adalah benar merupakan hasil karya saya dan bukan merupakan plagiat dari karya orang lain atau pengutipan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika yang berlaku dalam tradisi keilmuan. Apabila suatu saat terbukti saya melakukan plagiat maka saya bersedia diproses dan menerima sanksi akademis maupun hukum sesuai dengan hukum dan ketentuan yang berlaku, baik di institusi UNP maupun di Masyarakat dan negara.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan rasa tanggung jawab sebagai anggota masyarakat ilmiah

Diketahui Oleh,
Ketua Departemen Statistika



Dr. Yenni Kurniawati, S.Si., M.Si
NIP. 198402232010122005

Saya yang menyatakan,



Fauzan Arrahman
NIM. 21337074

Peramalan Konsentrasi PM_{2.5} di Kota Medan Menggunakan Metode Arimax dengan Faktor Meteorologi sebagai Variabel Eksogen

Fauzan Arrahman

ABSTRAK

Particulate Matter 2.5 (PM_{2.5}) merupakan partikel halus berukuran kurang dari 2,5 mikrometer yang berbahaya bagi kesehatan manusia karena dapat menembus sistem pernapasan dan menyebabkan gangguan kardiovaskular. Konsentrasi PM_{2.5} yang tinggi mencerminkan penurunan kualitas udara, sehingga diperlukan upaya peramalan untuk mendukung pengendalian lingkungan. Mengingat fluktuasi konsentrasi PM_{2.5} tidak hanya bergantung pada data historis, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi atmosfer, maka memasukkan variabel meteorologi ke dalam proses peramalan menjadi penting untuk memperoleh estimasi yang lebih akurat.

Penelitian ini bertujuan untuk meramalkan konsentrasi PM_{2.5} harian di Kota Medan menggunakan metode *Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables* (ARIMAX) dengan mempertimbangkan faktor meteorologi sebagai variabel eksogen. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data AQI PM_{2.5} dari situs AQICN yang di interpolasikan menggunakan standar *United States Environmental Protection Agency* (US EPA) dan data meteorologi dari BMKG. Variabel meteorologi yang digunakan yaitu suhu rata-rata, kelembapan rata-rata, curah hujan dan kecepatan angin rata-rata.

Hasil analisis menunjukkan bahwa model terbaik adalah ARIMAX (4,1,0) dengan variabel eksogen suhu rata-rata dan curah hujan, dimana suhu berpengaruh positif dan curah hujan berpengaruh negatif terhadap PM_{2.5}. Model ini memenuhi asumsi *white noise* dan normalitas residual, dengan nilai MAPE sebesar 20,635%, yang menunjukkan tingkat akurasi prakiraan yang cukup baik. Hasil prakiraan menunjukkan konsentrasi PM_{2.5} berada pada kisaran 19–26 µg/m³ dengan tren penurunan pada akhir Juni 2025.

Kata Kunci: ARIMA, ARIMAX, Medan, Meteorologi, PM_{2.5}.

Forecasting PM_{2.5} Concentration in Medan City Using the ARIMAX Method with Meteorological Factors as Exogenous Variables

Fauzan Arrahman

ABSTRACT

Particulate Matter 2.5 (PM_{2.5}) is a fine particle measuring less than 2.5 micrometers which is dangerous for human health because it can penetrate the respiratory system and cause cardiovascular disorders. High PM_{2.5} concentrations reflect a decline in air quality, so forecasting efforts are needed to support environmental control. Considering that fluctuations in PM_{2.5} concentrations do not only depend on historical data, but are also influenced by atmospheric conditions, incorporating meteorological variables into the forecasting process is important to obtain more accurate estimates.

This research aims to forecast daily PM_{2.5} concentrations in Medan City using the Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables (ARIMAX) method, considering meteorological factors as exogenous variables. The data used in this research is AQI PM_{2.5} data from the AQICN site which is interpolated using United States Environmental Protection Agency (US EPA) standards and meteorological data from BMKG. The meteorological variables used are average temperature, average humidity, rainfall and average wind speed.

The analysis results show that the best model is ARIMAX (4,1,0) with exogenous variables of average temperature and rainfall, where temperature has a positive effect and rainfall has a negative effect on PM_{2.5}. This model meets the assumptions of white noise and residual normality, with a MAPE value of 20.635%, indicating a fairly good level of forecasting accuracy. The forecasting results show PM_{2.5} concentrations in the range of 19–26 µg/m³ with a downward trend at the end of June 2025.

Keywords: ARIMA, ARIMAX, Medan, Meteorologi, PM_{2.5}.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Peramalan Konsentrasi $PM_{2.5}$ di Kota Medan Menggunakan Metode ARIMAX dengan Faktor Meteorologi sebagai Variabel Eksogen”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana di Program Studi Sarjana Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari dukungan, bimbingan, serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Dr. Yenni Kurniawati, S.Si., M.Si., sebagai Kepala Departemen sekaligus Koordinator Program Studi Sarjana Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang.
2. Ibu Tessy Octavia Mukhti, M.Stat., sebagai Dosen Penasehat Akademik sekaligus Dosen Pembimbing Skripsi yang telah memberikan arahan dan bimbingannya kepada peneliti dalam menyusun skripsi ini.
3. Bapak Dr. Dony Permana, M.Si., dan Ibu Fenni Kurnia Mutiya M.Stat., sebagai Dosen Pembahas yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun kepada peneliti.
4. Bapak dan Ibu Dosen serta Tenaga Kependidikan Departemen Statistika Fakultas Matematika Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Padang yang telah membantu penulis selama menimba ilmu di Departemen Statistika,

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang.

5. Teristimewa kepada kedua orang tua tercinta, Bapak Rinaldi dan Ibuk Zulfiani, S.Pd.SD., serta saudara penulis yaitu Fauzi Arrahim yang telah memberikan kasih sayang, semangat, nasehat, dukungan dan do'a selama masa perkuliahan dan dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Teman-teman seperjuangan yang selalu memberikan semangat, kerja sama, dan kebersamaan yang sangat berarti bagi peneliti.

Semoga semua kebaikan dan ketulusan dibalas oleh Allah SWT sebagai amal ibadah. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna dan masih terdapat kekurangan didalamnya. Oleh karena itu, penulis mengharapkan masukan dan saran yang membangun dari pembaca. Semoga penulisan skripsi ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang memerlukannya.

Padang, Oktober 2025

Penulis

Fauzan Arrahman

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang Masalah	1
B. Batasan Masalah.....	10
C. Rumusan Masalah	10
D. Tujuan Penelitian.....	10
E. Manfaat Penelitian.....	11
BAB II KERANGKA TEORITIS	13
A. <i>Air Quality Indeks</i>	13
B. Konsentrasi PM _{2.5}	14
C. Interpolasi Linier	15
D. Faktor Meteorologi.....	17
E. Analisis Deret Waktu.....	21
F. Peramalan	23
G. Peramalan Deret Waktu	25
H. Penanganan <i>Missing Value</i>	26
I. <i>Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)</i>	32
J. <i>Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables (ARIMAX)</i>	34
K. Tahapan Peramalan dengan ARIMAX.....	35
L. Evaluasi Model.....	45
BAB III METODE PENELITIAN	47
A. Jenis Penelitian	47
B. Jenis dan Sumber Data	47

C. Variabel Data	47
D. Struktur Data	48
E. Teknik Analisis Data	48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	53
A. Hasil Penelitian	53
B. Pembahasan	69
BAB V PENUTUP	72
A. Kesimpulan.....	72
B. Saran.....	73
DAFTAR PUSTAKA.....	74
LAMPIRAN.....	78

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Kategori <i>Air Quality Indeks</i> (AQI)	13
2. Kategori Konsentrasi PM _{2.5}	15
3. Nilai Lambda dan Transformasi	36
4. Interpretasi Nilai MAPE terhadap Hasil Peramalan	46
5. Variabel Penelitian	47
6. Struktur Data.....	48
7. Statistika Deskriptif PM _{2.5} Kota Medan	54
8. Statistika Deskriptif Meteorologi di Kota Medan	55
9. Hasil Pengujian Stasioner Terhadap Ragam	60
10. Model ARIMA.....	62
11. Uji <i>White Noise</i> ARIMA.....	64
12. Uji Normalitas Residual ARIMA	64
13. AIC dan BIC	65
14. Model ARIMAX.....	65
15. Model ARIMAX Signifikan	66
16. Hasil Peramalan PM _{2.5} Periode 11 Juni – 30 Juni 2025	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta Konsentrasi Tahunan $PM_{2.5}$ Global pada Tahun 2024.....	3
2. (a) Peta Sebaran $PM_{2.5}$ Tahun 2024 dan (b) Grafik Rata-rata Tahunan $PM_{2.5}$ Kota-kota Besar di Indonesia (2020–2024).....	4
3. Konsentrasi $PM_{2.5}$ di Kota Medan 1 Juni 2024-10 Juni 2025	6
4. Pola Horizontal.....	22
5. Pola Musiman.....	22
6. Pola Siklis.....	23
7. Pola Tren.....	23
8. Flowchart Algoritma ARIMAX.....	52
9. Boxplot Konsentrasi $PM_{2.5}$ di Kota Medan	54
10. Syntaks Kalman Filter	56
11. Hasil Imputasi Data $PM_{2.5}$	57
12. Hasil Imputasi Data Suhu Rata-rata	58
13. Hasil Imputasi Data Kelembapan Rata-rata	58
14. Hasil Imputasi Data Curah Hujan	59
15. (a) Plot ACF dan (b) Plot PACF	60
16. (a) Plot ACF dan (b) Plot PACF Setelah <i>Differencing</i>	61
17. Hasil Peramalan $PM_{2.5}$ Kota Medan Periode 11 Juni – 30 Juni 2025	68

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Data PM _{2.5} dan Faktor Meteorologi.....	78
2. Hasil Interpolasi Linier US EPA.....	87
3. Imputasi Data Menggunakan Kalman Filter	92
4. Hasil Output Analisis Menggunakan <i>Software</i> R Studio	101
5. Syntaks R Studio	109

BAB 1

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Kualitas udara merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi kesehatan dan kesejahteraan manusia (Daniswara dkk., 2024). Udara yang bersih yang ditandai dengan bebas dari polutan, berperan penting dalam menjaga sistem pernapasan, meningkatkan produktivitas, serta mendukung kualitas hidup secara keseluruhan. Sebaliknya, kualitas udara yang buruk ditandai dengan tingginya tingkat pencemaran atau polusi udara yang dapat memicu berbagai masalah kesehatan serius hingga peningkatan angka kematian dini (WHO, 2021).

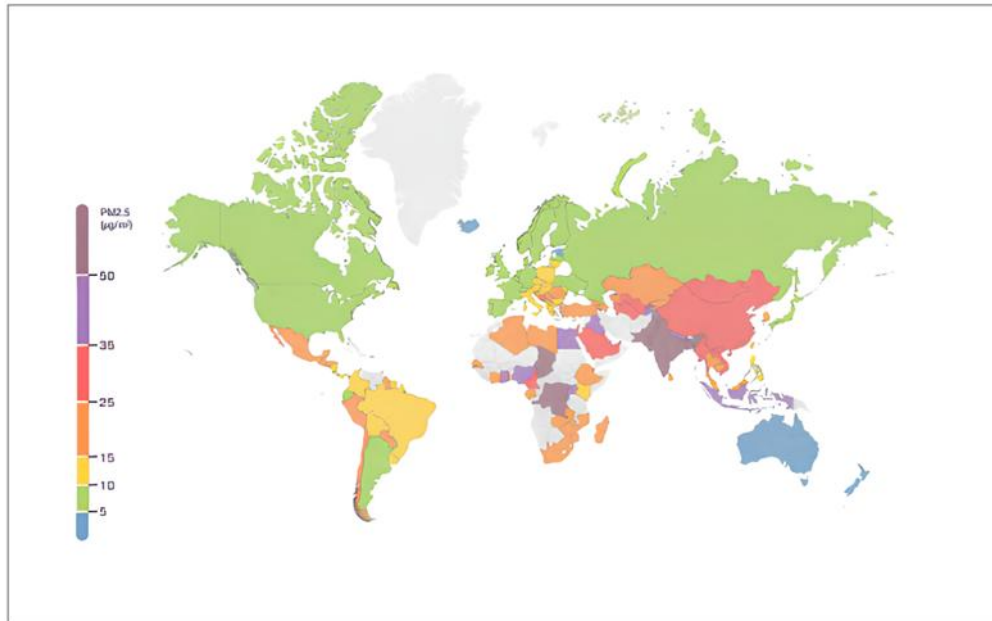
Menurut *World Health Organization* (WHO), Sejak tahun 2006, polusi udara telah diakui sebagai ancaman lingkungan terbesar terhadap kesehatan manusia karena kontribusinya yang signifikan terhadap peningkatan beban penyakit secara global (WHO, 2021). Menurut Anandari dkk. (2024), polusi udara telah menjadi masalah lingkungan dengan jangkauan dan dampak yang sangat luas terhadap berbagai aspek kehidupan. Kondisi tersebut menunjukkan pentingnya pemantauan kualitas udara untuk menilai sejauh mana pencemaran udara berdampak terhadap kesehatan masyarakat.

Salah satu alat ukur yang digunakan secara global adalah *Air Quality Index* (AQI). AQI terdiri dari beberapa parameter polutan yang memengaruhinya, di mana Badan *United States Environmental Protection Agency* (US EPA) menetapkan AQI, terdiri dari enam jenis polutan utama yaitu *Ozone* (O₃), *Carbon Monoxide* (CO), *Nitrogen Dioxide* (NO₂), *Sulfur Dioxide* (SO₂), dan *Particulate Matter* (PM₁₀ dan PM_{2.5}) (US EPA, 2024). Berdasarkan dari polutan-polutan yang memengaruhi AQI

tersebut, secara global $PM_{2.5}$ merupakan faktor risiko utama bagi kondisi pernapasan dan kardiovaskular, yang berkontribusi terhadap kematian dini dan morbiditas (Yu dkk., 2023). $PM_{2.5}$ yang berukuran sekitar 1/30 dari lebar sehelai rambut manusia menjadi perhatian utama kesehatan masyarakat global karena kemampuannya menembus sistem pernapasan atas (hidung, tenggorokan, dan saluran awal) hingga ke sistem pernapasan bawah (trakea, bronkus, dan paru-paru) (Sangkham dkk., 2024).

Menurut IQAir (2024), $PM_{2.5}$ merupakan partikel halus dengan diameter kurang dari atau sama dengan 2,5 mikrometer, dilaporkan dalam satuan mikrogram per meter kubik ($\mu g/m^3$). Di mana 1 mikrometer ($1 \mu m$) setara 0,001 milimeter atau sama dengan 10^{-6} meter. Ukuran yang sangat kecil ini menjadikan $PM_{2.5}$ sebagai salah satu dari enam polutan utama yang diakui dan dipantau secara global karena dampaknya yang paling signifikan terhadap kesehatan manusia. Paparan $PM_{2.5}$ baik jangka pendek maupun jangka panjang, dapat menimbulkan risiko berbagai penyakit pada manusia bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah (Sangkham dkk., 2024). Oleh karena itu, $PM_{2.5}$ secara luas diklasifikasikan sebagai "Pembunuh Tak Terlihat" di antara polutan udara lainnya (Basith dkk., 2022).

Berdasarkan data dari IQAir (2024), sebagian besar wilayah di dunia masih mencatat konsentrasi $PM_{2.5}$ tahunan yang melebihi batas aman WHO yaitu sebesar $5 \mu g/m^3$. Hal ini sejalan dengan data dari WHO yang menyatakan bahwa lebih dari 90% populasi dunia masih menghirup udara yang melampaui ambang batas aman bagi kesehatan (WHO, 2021). Gambar 1 merupakan peta semua negara di dunia berdasarkan tingkat konsentrasi $PM_{2.5}$.



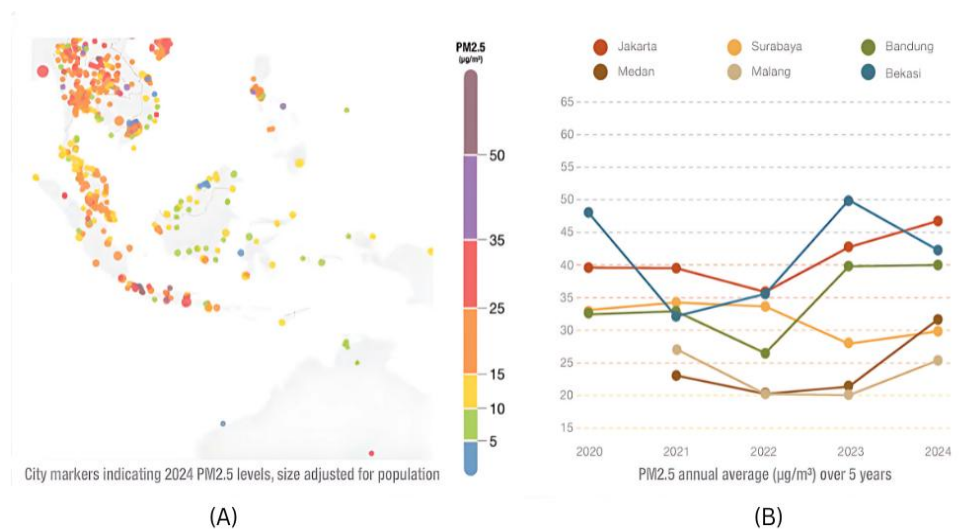
Sumber : IQAir (2024), *World Air Quality Report 2024*

Gambar 1. Peta Konsentrasi Tahunan PM_{2.5} Global pada Tahun 2024

Berdasarkan Gambar 1 dapat dilihat bahwa sebagian besar negara di dunia masih mengalami tingkat polusi udara yang tinggi. Kawasan di Australia ditandai dengan warna biru yang menunjukkan bahwa konsentrasi PM_{2.5} rendah ($< 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Negara-negara di kawasan Amerika Utara dan Eropa Utara ditandai oleh warna hijau, kuning, dan biru yang menunjukkan konsentrasi PM_{2.5} relatif sedang ($< 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Negara-negara kawasan Asia Selatan seperti India, Pakistan, dan Bangladesh menunjukkan tingkat polusi tertinggi, ditandai dengan warna merah tua hingga coklat ($> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Hal ini menunjukkan bahwa kualitas udara di berbagai belahan dunia masih jauh dari ambang batas aman yang ditetapkan oleh WHO, yaitu sebesar $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dan menegaskan bahwa sebagian besar populasi global masih menghirup udara yang tidak sehat.

Fenomena tingginya konsentrasi PM_{2.5} tidak hanya terjadi di negara-negara maju, tetapi juga menjadi persoalan serius di negara berkembang seperti Indonesia. Sebagai negara kepulauan dengan jumlah penduduk yang lebih dari seperempat

miliar jiwa, isu kualitas udara di Indonesia telah menjadi perhatian utama, terutama di kota-kota metropolitan (Rahmawati & Pratama, 2023). Tingginya faktor emisi seperti aktivitas industri, kepadatan lalu lintas, pertumbuhan wilayah urban menjadi sumber polutan di udara. Gambar 2 berikut menunjukkan bahwa beberapa kota di Asia Tenggara dan khususnya kota-kota besar di Indonesia memiliki tingkat polusi yang masih melampaui ambang batas standar pedoman WHO dari tahun ke tahun.



Sumber : IQAir (2024), *World Air Quality Report 2024*

Gambar 2. (a) Peta Sebaran PM_{2.5} Tahun 2024 dan (b) Grafik Rata-rata Tahunan PM_{2.5} Kota-kota Besar di Indonesia (2020–2024)

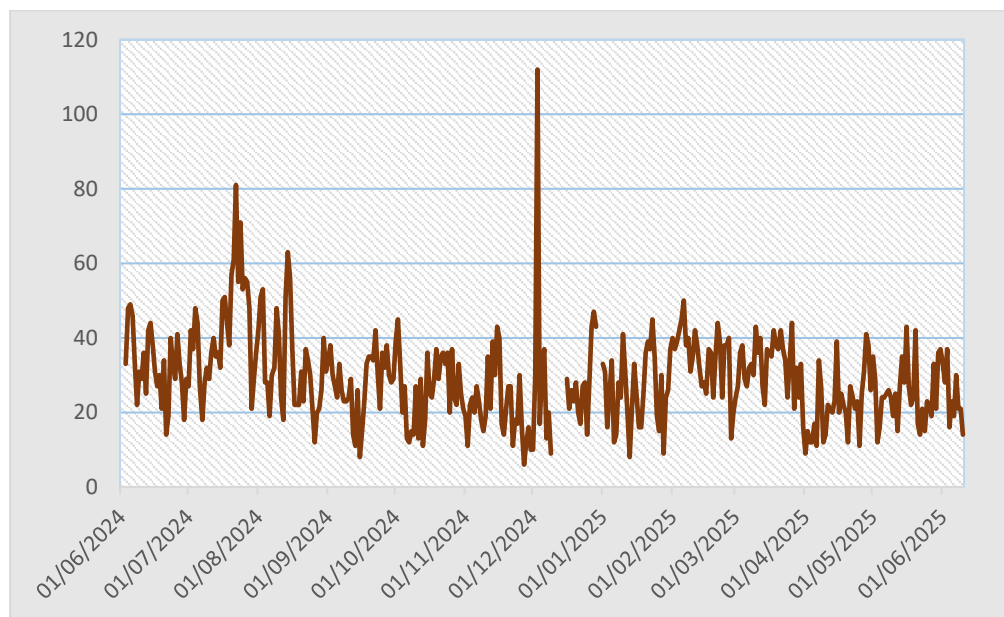
Berdasarkan Gambar 2 (a), dapat dilihat peta sebaran konsentrasi PM_{2.5} tahun 2024 di kawasan Asia Tenggara, dengan warna titik menunjukkan tingkat konsentrasi PM_{2.5}. Sementara Gambar 2 (b) menunjukkan grafik rata-rata tahunan PM_{2.5} dari tahun 2020 hingga 2024 pada enam kota besar Indonesia yaitu Jakarta, Surabaya, Bandung, Medan, Malang, dan Bekasi. Kota Medan menjadi satu-satunya perwakilan dari luar Pulau Jawa, tepatnya dari wilayah Pulau Sumatera, yang ditampilkan dalam grafik tersebut. Selama periode 2020 hingga 2023, Kota Medan menunjukkan nilai PM_{2.5} yang relatif rendah dibandingkan kota-kota lainnya. Namun, pada tahun 2024 terjadi lonjakan yang cukup tajam pada nilai

PM_{2.5} di Kota Medan. Kenaikan ini menandakan adanya penurunan signifikan dalam kualitas udara di kota tersebut, yang sebelumnya memiliki tingkat polusi yang lebih rendah. Medan tercatat sebagai kota dengan konsentrasi PM_{2.5} tertinggi keempat di Indonesia. Fenomena ini menjadi sorotan penting karena menunjukkan bahwa permasalahan polusi udara kini juga semakin nyata di luar Pulau Jawa, khususnya di wilayah Sumatera, sehingga Kota Medan perlu mendapatkan perhatian dalam upaya pemantauan dan pengendalian kualitas udara.

Kota Medan merupakan kota terbesar ketiga di Indonesia setelah Jakarta dan Surabaya (Yudha & Susilawati, 2025). Status ini ditunjukkan oleh jumlah penduduk yang melebihi 2,4 juta jiwa (BPS Kota Medan, 2024) dan posisinya sebagai pusat utama kawasan metropolitan *Greater Medan* (Mebidangro) (BPS Sumatera Utara, 2024). Selain itu, Medan juga memiliki peran strategis sebagai pusat ekonomi, perdagangan, dan pemerintahan di wilayah Sumatera Utara. Sebagai kota besar dengan aktivitas penduduk yang tinggi, Medan kerap mengalami permasalahan polusi udara (Mustaqiman dkk., 2025).

Salah satu isu lingkungan penting adalah tingginya konsentrasi PM_{2.5} di atmosfer. Konsentrasi ini tidak hanya dipengaruhi oleh sumber emisi, tetapi juga sangat ditentukan oleh kondisi meteorologi seperti suhu, kelembapan, curah hujan, dan angin. Faktor meteorologi dipilih dalam penelitian ini karena bersifat lebih dinamis secara harian, mudah diakses dalam bentuk data deret waktu, dan secara langsung memengaruhi pergerakan serta konsentrasi polutan di atmosfer. Berbeda dengan faktor emisi seperti industri atau transportasi yang relatif stabil per hari, sehingga variasinya sulit ditangkap dalam analisis jangka pendek (Liu dkk., 2020), variabel meteorologi justru memberikan gambaran yang lebih relevan terhadap

fluktuasi konsentrasi $PM_{2.5}$. Dengan demikian, analisis kondisi atmosfer menjadi penting untuk memahami dinamika kualitas udara di Medan. Pada Gambar 3 dapat dilihat fluktuasi konsentrasi $PM_{2.5}$ di Kota Medan selama periode 1 Juni 2024 hingga 10 Juni 2025.



Gambar 3. Konsentrasi $PM_{2.5}$ di Kota Medan 1 Juni 2024-10 Juni 2025

Berdasarkan Gambar 3, konsentrasi $PM_{2.5}$ harian di Kota Medan pada periode 1 Juni 2024 hingga 10 Juni 2025 menunjukkan pola yang berfluktuasi dengan kisaran rata-rata 20 sampai dengan 40 $\mu g/m^3$. Lonjakan paling signifikan terjadi pada hari Selasa, 3 Desember 2024. Konsentrasi $PM_{2.5}$ meningkat tajam hingga melebihi 100 $\mu g/m^3$. Peningkatan ini dipengaruhi oleh aktivitas pembangunan besar, seperti proyek *underpass* di Jalan H.M. Yamin dengan target penyelesaian pada Desember 2024, serta pembangunan sistem drainase kolektor luar di kawasan Stadion Teladan yang masih berlangsung pada akhir tahun 2024 dengan progres sekitar 58% (Portal Medan, 2024; Mar24News, 2024).

Faktor meteorologi merupakan unsur-unsur atmosfer yang memengaruhi kondisi cuaca dan iklim seperti suhu rata-rata, suhu maksimum, suhu minimum,

curah hujan, kelembapan rata-rata, kecepatan angin rata-rata, kecepatan angin maksimum, arah angin terbanyak dan arah angin pada saat kecepatan maksimum (BMKG, 2024). Unsur-unsur ini turut menentukan distribusi dan konsentrasi polutan udara, termasuk $PM_{2.5}$.

Zender-Świercz dkk. (2024) menunjukkan bahwa suhu dan kelembapan udara memengaruhi konsentrasi $PM_{2.5}$, namun pengaruhnya bervariasi tergantung pada tingkat pencemaran udara. Penelitian Syafaati dkk. (2023) di Kota Sorong yang menunjukkan bahwa konsentrasi $PM_{2.5}$ memiliki korelasi negatif yang kuat dengan curah hujan ($r = -0.70$), korelasi positif yang kuat dengan suhu ($r = 0.80$), serta korelasi positif yang sedang dengan kelembapan ($r = 0.40$). Penelitian Serlina dkk. (2023) menunjukkan bahwa konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan suhu, tekanan udara, kecepatan angin, dan kelembapan menunjukkan hubungan yang berbanding terbalik dilihat dari tanda negatif pada variabel hasil regresi linear dan nilai koefisien korelasi pada rentang -0.90481 sampai dengan -0.93514 , dimana hal ini menunjukkan bahwa pengaruh antara kondisi meteorologi dengan konsentrasi $PM_{2.5}$ sangat kuat. Temuan-temuan tersebut sejalan dengan penelitian Chen dkk (2020) yang mengidentifikasi suhu, kelembapan, curah hujan, dan kecepatan angin sebagai faktor dominan yang memengaruhi $PM_{2.5}$ melalui mekanisme fisik dan kimia seperti dispersi, deposisi, dan reaksi atmosfer. Berdasarkan landasan tersebut, penelitian ini menggunakan empat variabel meteorologi utama suhu, kelembapan, curah hujan, dan kecepatan angin sebagai variabel eksogen dalam pemodelan dan peramalan konsentrasi $PM_{2.5}$.

Meningkatnya perhatian terhadap dampak kesehatan akibat polusi udara, khususnya paparan jangka panjang terhadap $PM_{2.5}$, mendorong perlunya sistem

peringatan dini dan strategi pengendalian kualitas udara. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah peramalan konsentrasi $PM_{2.5}$, guna mendukung langkah mitigasi seperti pembatasan aktivitas luar ruang, pengaturan lalu lintas, atau penyampaian imbauan kesehatan kepada masyarakat.

Melihat adanya pengaruh yang signifikan dari variabel meteorologi terhadap fluktuasi konsentrasi $PM_{2.5}$, maka diperlukan metode peramalan yang tidak hanya mengandalkan data historis $PM_{2.5}$, tetapi juga mempertimbangkan faktor-faktor tersebut. Peramalan yang komprehensif ini sangat penting untuk mendukung pengambilan keputusan yang cepat dan berbasis data dalam pengendalian polusi udara serta mitigasi dampak kesehatan.

Peramalan atau dikenal dengan *forecasting* merupakan metode statistika yang digunakan untuk pertimbangan dalam pengambilan keputusan berdasarkan hasil prediksi (Khoiri, 2023). Dalam upaya menghasilkan prediksi yang akurat, diperlukan metode analisis yang sesuai dengan karakteristik data yang digunakan. Salah satu analisis yang digunakan adalah Analisis deret waktu.

Analisis deret waktu menjadi pendekatan yang relevan karena mampu menangkap dinamika data yang bersifat berkala. Menurut Makridakis dkk., (2006), analisis deret waktu adalah sekumpulan pengamatan yang diukur pada titik waktu yang berurutan atau selama periode waktu yang berurutan. Menurut Khoiri (2023) analisis deret waktu merupakan analisis statistika yang digunakan untuk mengolah data observasi atau data amatan yang berbentuk urutan waktu. Analisis deret waktu telah banyak digunakan dalam berbagai bidang seperti ekonomi, iklim, dan lingkungan karena kemampuannya memodelkan pola masa lalu untuk memprediksi masa depan.

Salah satu model yang umum digunakan dalam analisis deret waktu adalah *Autoregressive Integrated Moving Average* (ARIMA). Metode ARIMA pertama kali muncul pada abad ke-20 namun diformulasikan ulang oleh Box-Jenkins pada tahun 1970 sehingga metode ini juga dikenal dengan ARIMA Box-Jenkins (Khoiri, 2023). Metode ini bekerja berdasarkan pola historis dari variabel yang diamati. Namun, ARIMA memiliki keterbatasan karena tidak dapat mengakomodasi pengaruh variabel luar atau eksogen. Untuk mengatasi hal ini, dikembangkan model *Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables* (ARIMAX) yang memungkinkan integrasi antara variabel utama dan variabel luar yang relevan, seperti faktor meteorologi. Dengan demikian, ARIMAX menjadi model yang lebih unggul dalam memprediksi konsentrasi $PM_{2.5}$ yang dipengaruhi oleh kondisi eksternal yaitu faktor meteorologi.

Beberapa penelitian sebelumnya mendukung keunggulan ARIMAX untuk peramalan kualitas udara. Misalnya, penelitian Anggraeni dkk. (2017) menemukan ARIMAX lebih akurat dibanding VAR dalam prediksi harga komoditas yang dipengaruhi variabel eksogen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model ARIMAX dapat memprediksi harga konsumen padi dengan MAPE 0,15%. Hal ini lebih baik 15,27% dibandingkan model VAR. Penelitian Muzakki dkk. (2024) menunjukkan bahwa peramalan dengan metode ARIMA menghasilkan MAPE 21,04% sedangkan peramalan dengan menggunakan metode ARIMAX menghasilkan MAPE sebesar 20,19%. Penambahan variabel meteorologi ke dalam model ARIMAX meningkatkan akurasi prediksi konsentrasi $PM_{2.5}$ dibandingkan ARIMA biasa.

Berdasarkan uraian yang telah dipaparkan sebelumnya, maka penulis tertarik melakukan penelitian yang diberi judul **“Peramalan Konsentrasi PM_{2.5} di Kota Medan Menggunakan Metode ARIMAX dengan Faktor Meteorologi Sebagai Variabel Eksogen”**.

B. Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki beberapa batasan sebagai berikut:

1. Data PM_{2.5} yang digunakan merupakan hasil konversi dari AQI menggunakan interpolasi linier berdasarkan standar US-EPA, dengan periode 1 Juni 2024 hingga 10 Juni 2025.
2. Variabel eksogen terdiri dari suhu udara rata-rata, kelembapan udara rata-rata, kecepatan angin rata-rata, dan curah hujan, dengan periode data yang sama, yaitu 1 Juni 2024 hingga 10 Juni 2025.
3. Metode yang digunakan adalah ARIMAX, yaitu pengembangan dari ARIMA dengan penambahan variabel eksogen pada model ARIMA biasa.

C. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana model ARIMAX dengan mempertimbangkan variabel meteorologi untuk meramalkan nilai konsentrasi PM_{2.5} di Kota Medan?
2. Seberapa akurat model ARIMAX dalam memprediksi nilai konsentrasi PM_{2.5} berdasarkan data historis dan variabel meteorologi di Kota Medan?
3. Bagaimana hasil peramalan konsentrasi PM_{2.5} di bulan Juni 2025 dengan Model ARIMAX dengan faktor meteorologi sebagai variabel eksogen?

D. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Untuk Mengetahui model ARIMAX dalam meramalkan nilai konsentrasi $PM_{2.5}$ dengan mempertimbangkan pengaruh faktor-faktor meteorologi di Kota Medan.
2. Untuk mengetahui akurasi ARIMAX dalam memprediksi konsentrasi $PM_{2.5}$ melalui pengukuran akurasi menggunakan MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*).
3. Untuk mengetahui hasil peramalan konsentrasi $PM_{2.5}$ di Kota Medan bulan Juni 2025 Menggunakan model ARIMAX dengan faktor meteorologi sebagai variabel eksogen.

E. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak sebagai berikut:

1. Bagi Peneliti, menjadi sarana untuk menerapkan dan mengembangkan kemampuan analisis data deret waktu menggunakan metode ARIMAX, khususnya dalam konteks peramalan kualitas udara berbasis data konsentrasi $PM_{2.5}$ dan variabel meteorologi.
2. Bagi Masyarakat, penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi awal mengenai potensi risiko kualitas udara di Kota Medan, sehingga masyarakat dapat lebih waspada dan mengambil langkah-langkah pencegahan terhadap paparan udara yang tidak sehat, khususnya pada kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan penderita penyakit pernapasan.
3. Bagi lembaga Pemerintah, hasil peramalan ini dapat menjadi bahan pertimbangan awal untuk memahami dinamika kualitas udara. Dengan adanya variabel meteorologi dalam analisis, penelitian ini berpotensi

memberi masukan ilmiah yang mendukung pengembangan sistem informasi lingkungan serta pemahaman yang lebih baik mengenai kondisi udara di Kota Medan.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai peramalan konsentrasi PM_{2.5} menggunakan metode ARIMAX dengan faktor meteorologi sebagai variabel eksogen, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Model yang didapatkan untuk peramalan konsentrasi PM_{2.5} di Kota Medan menggunakan model ARIMAX dengan faktor meteorologi sebagai variabel eksogen adalah sebagai berikut:

$$(1 - B)^1 \phi(B) Z_t = \varepsilon_t + 0.178316 \text{ Suhu}_t - 0.007584 \text{ Curah Hujan}_t$$

Dengan $\phi(B)$ didefinisikan sebagai:

$$\phi(B) = 1 - 0.466558B - 0.405221B^2 - 0.235384B^3 - 0.137148B^4$$

2. Hasil evaluasi model didapatkan nilai *Mean Absolut Percentege Error* (MAPE) sebesar 20,476%. Dimana dapat disimpulkan bahwa model ARIMAX (4,1,0) dengan variabel eksogen suhu rata-rata dan curah hujan cukup baik dalam meramalkan data PM_{2.5}
3. Hasil peramalan konsentrasi PM_{2.5} di Kota Medan pada periode 11–30 Juni 2025 berfluktuasi di kisaran 15–26 µg/m³. Nilai tertinggi diperkirakan terjadi pada 26 Juni 2025 (25,501 µg/m³), sedangkan nilai terendah tercatat pada 29 Juni 2025 (15,917 µg/m³).

B. Saran

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, beberapa saran yang dapat diajukan untuk pengembangan hasil yang diperoleh ke depannya adalah:

1. Penelitian ini hanya menggunakan variabel eksogen yang terbatas pada faktor-faktor meteorologi. Oleh karena itu, disarankan bagi penelitian selanjutnya untuk menambahkan variabel lain, seperti faktor sosial ekonomi, atau sumber emisi antropogenik, guna memperoleh hasil peramalan yang lebih komprehensif.
2. Penelitian di masa mendatang juga dapat mengembangkan metode ARIMAX dengan mengombinasikannya bersama metode *machine learning* seperti *Long Short-Term Memory* (LSTM) atau *Artificial Neural Network* (ANN) agar dapat meningkatkan akurasi dan kemampuan model dalam menangkap pola nonlinier pada data.
3. Penulis juga menyadari bahwa penelitian ini masih memiliki keterbatasan, oleh karena itu diharapkan adanya kritik dan saran yang bersifat membangun guna penyempurnaan penelitian dimasa yang akan datang.

DAFTAR PUSTAKA

- Afidah, Nashihahatul. 2023. *Hubungan Faktor Meteorologi dengan Kasus Pneumonia pada Balita di Kota Surabaya Tahun 2017–2021*. Skripsi. Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Airlangga, Surabaya.
- Anandari, A. A., Wadjdi, A. F., & Harsono, G. (2024). *Dampak polusi udara terhadap kesehatan dan kesiapan pertahanan negara di Provinsi DKI Jakarta. Journal on Education*, 6(2), 10868–10884. <https://doi.org/10.31004/joe.v6i2.4880>
- Anggraeni, W., Andri, K. B., Sumaryanto, & Mahananto, F. (2017). *The Performance of ARIMAX Model and Vector Autoregressive (VAR) Model in Forecasting Strategic Commodity Price in Indonesia. Procedia Computer Science*, 124, 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.146>
- Badan Pusat Statistik Kota Medan. (2025). *Kota Medan dalam Angka 2025 (Medan Municipality in Figures 2025)*. Medan: Badan Pusat Statistik Kota Medan. <https://medankota.bps.go.id>
- Badan Pusat Statistik Sumatera Utara. (2024). *Sumatera Utara dalam Angka 2024 (Sumatera Utara Province in Figures 2024)*. Sumatera Utara: Badan Pusat Statistik Sumatera Utara. <https://sumut.bps.go.id/>
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). (2014). *Konsep Implementasi Adaptasi Sektor Perubahan Iklim*. Pusat Penelitian dan Pengembangan, Badan Meteorologi,
- Bashan, N. F., Li, W., dan Wang, Q. R. (2024). “Dynamics of PM_{2.5} and network activity during extreme pollution events”, *npj Climate and Atmospheric Science*, Vol. 7, No. 171, hal. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00716z>
- Basith, S., Manavalan, B., Shin, T. H., Park, C. B., Lee, W. S., Kim, J., & Lee, G. (2022). *The impact of fine particulate matter 2.5 on the cardiovascular system: A review of the invisible killer. Nanomaterials*, 12 (15), 2656. <https://doi.org/10.3390/nano12152656>
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2016). *Time series analysis: Forecasting and control* (5th ed.). John Wiley & Sons.
- Chen, Z., Chen, D., Zhao, C., Kwan, M., Cai, J., Yanzhuang, B., Zhao, F., Wang, X., Chen, B., Yang, J., Li, R., Di, B., Gao, B., & Wang, K. (2020). *Influence of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations across China: A review of methodology and mechanism. Environment International*, 139, 105558. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105558>

- Daniswara, D. D., Damaliana, A. T., dan Diyasa, I. G. S. M. (2024). “Pengukuran Indeks Standar Pencemaran Udara Menggunakan Support Vector Machine”, *Edisi XLIII, Vol. 9, No. 1, hal. 63–69*.
- Enders, W. (2014). *Applied Econometric Time Series (4th ed.)*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2009). *Basic econometrics (5th ed.)*. New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Iramawati, C., Turmuzi, M., Suryati, I., Setyowati, L., & Mahyuni, E. L. (2018). *Pengaruh kecepatan angin, kelembapan dan suhu udara terhadap konsentrasi SO₂ ambien dan pemetaan SO₂ ambien di sekitar PT. Kawasan Industri Medan. Jurnal Dampak, 15(2), 72–76. <https://doi.org/10.25077/dampak.15.2.72-76.2018>*
- IQAir. (2024). “2024 World Air Quality Report: Region & City PM_{2.5} Ranking”, Swiss Technology Company, AirVisual Platform, Switzerland. <https://www.iqair.com/worldairquality-report>
- Khoiri, H. A. (2023, November 27). *Analisis Deret Waktu Univariat: Teori dan Pengolahan Data*.
- Kontopoulou, V. I., Panagopoulos, A. D., Kakkos, I., & Matsopoulos, G. K. (2023). *A review of ARIMA vs. machine learning approaches for time series forecasting in data-driven networks. Future Internet, 15(8), 255. <https://doi.org/10.3390/fi15080255>*
- Lai, M., Wulff, S. S., Cao, Y., Robinson, T. J., & Rajapaksha, R. (2023). *An interpretable time series machine learning method for varying forecast and nowcast lengths in wastewater-based epidemiology. MethodsX, 11, 102382. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102382>*
- Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Lei, R., Davis, S. J., Feng, S., et al. (2020). “Near-real-time monitoring of global CO₂ emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic”, *Nature Communications, Vol. 11, No. 5172, hal. 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18922-7>*
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (1998). *Forecasting: Methods and Applications (3rd ed.)*. New York: John Wiley & Sons.
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., dan McGee, V. E. (1983). *Forecasting: Methods and Applications (2nd ed.)*. New York: John Wiley & Sons.
- Muhaimin, Pandu Herdi. 2024. *Prediksi Hasil Produksi Tanaman Jagung Menggunakan Metode ARIMA Exogenous*. Skripsi. Malang: Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim

- Mustaqiman, A. N., Irawandani, T. D., Prayogo, W., & Suhardono, S. (2025). *Modeling air pollutant dispersion in urban areas: A HYSPLIT-based analysis of PM_{2.5} dynamics in Medan, Indonesia. Jurnal Lingkungan dan Rekayasa Kota*, X(1), 12004–12009. <https://doi.org/10.12345/hysplit.medan.2025>
- Muzakki, N. F., Putri, A. Z., Maruli, S., & Kartiasih, F. (2024). *Peramalan indeks kualitas udara dengan memanfaatkan beberapa faktor meteorologi menggunakan metode ARIMAX (Studi kasus: Kota Jakarta Pusat). Jurnal JTik (Jurnal Teknologi Informasi dan Komunikasi)*, 8(3), 569–586. <https://doi.org/10.35870/jtik.v8i3.2012>
- Nabiha, Putri Ziha. 2023. *Analisis Kualitas Udara (PM_{2.5}) dan Faktor Iklim (Kelembapan dan Curah Hujan) dengan Kejadian Tuberkulosis di Jakarta*. Laporan Magang. Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Airlangga, Surabaya.
- Palma, W. (2016). *Time series analysis*. John Wiley & Sons.
- Prasetyo, T. F., Gani, A., & Mufid, Z. (2025). *Pengaruh suhu, kelembapan dan angin terhadap polusi udara: Studi kasus dataset Air Quality. INSANTek – Jurnal Inovasi dan Sains Teknik Elektro*, 6(1), 43–51. <https://doi.org/10.31294/insantek.v6i1>
- Puspitasari, W. D. (2024). *Peramalan kualitas udara di Jakarta berdasarkan jumlah kendaraan bermotor menggunakan metode Artificial Neural Network Backpropagation* (Skripsi sarjana, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang). UIN Malang Repository.
- Qonitaa, I. R., Santikayasa, I. P., & Turyanti, A. (2025). *Analisis pengaruh faktor meteorologi terhadap fluktuasi konsentrasi PM_{2.5} di Kota Pontianak. Positron*, 15 (1), 24–33. <https://doi.org/10.26418/positron.v15i1.91566>
- Rahmayani, Lina. (2013). *Model ARIMAX dan SARIMAX untuk Meramalkan Data Curah Hujan*. Skripsi. Jurusan Matematika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati, Bandung.
- Sangkham, S., Phairuang, W., Sherchan, S. P., Pansakun, N., Munkong, N., Sarndhong, K., Islam, M. A., & Sakunkoo, P. (2024). *An update on adverse health effects from exposure to PM_{2.5}. Environmental Advances*, 18, 100603. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100603>
- Serlina, Y., Bachtiar, V. S., & Putra, I. (2023). *Analisis Konsentrasi Particulate Matter 2,5 di Udara Ambien dan Rekomendasi Tanaman Pereduksi PM_{2,5} di Perumahan Unand Blok B, Ulu Gadut, Kota Padang. Jurnal Serambi Engineering*, VIII(4), 7516–7524

- Sukmawati, P. D., & Warisaura, A. D. (2023). *Analisis pengaruh faktor meteorologi terhadap konsentrasi gas monoksida dan particulate matter di Jalan Gejayan, Yogyakarta. Jurnal Teknologi*, 8(3), 6561–6566.
- Syafaati, A. D., Utami, S. N. N., & Arifin, S. (2023). *Analisis kualitas udara parameter PM_{2.5} di wilayah Kota Sorong berbasis ISPU. Megasains: Jurnal Sains dan Teknologi*, 14(2), 6–13. <https://doi.org/10.46824/megasains.v14i2.131>
- Utami, Halimah Tri. 2019. *Analisis Korelasi Faktor Meteorologi dan Kualitas Udara dengan Pneumonia Balita di Kota Semarang Tahun 2013–2018*. Skripsi. Jurusan Ilmu Kesehatan Masyarakat, Fakultas Ilmu Keolahraagaan, Universitas Negeri Semarang
- U.S. Environmental Protection Agency. (2018). “*Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – The Air Quality Index (AQI)*”, EPA-454/B-18-007, Office of Air Quality Planning and Standards, Air Quality Assessment Division, Research Triangle Park, NC.
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>
- Wei, W. W. S. (2006). *Time Series Analysis: Univariate and Multivariate Methods* (2nd ed.). Boston: Pearson Addison Wesley.
- Yu, W., Ye, T., Zhang, Y., Xu, R., Lei, Y., Chen, Z., Yang, Z., Zhang, Y., Song, J., Yue, X., Li, S., & Guo, Y. (2023). *Global estimates of daily ambient fine particulate matter concentrations and unequal spatiotemporal distribution of population exposure: A machine learning modelling study. The Lancet Planetary Health*, 7(3), e209–e218. [https://doi.org/10.1016/S25425196\(23\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S25425196(23)00008-6)
- Yudha, M., & Susilawati. (2025). *Analisis kondisi polusi udara berdasarkan perubahan waktu menggunakan IoT dan logika fuzzy: Solusi mencegah dampak polusi terhadap kesehatan. INCODING: Journal of Informatics and Computer Science Engineering*, 3(2), 1–10.
- Zender-Świercz, E., Galiszewska, B., Telejko, M., & Starzomska, M. (2024). *The effect of temperature and humidity of air on the concentration of particulate matter – PM_{2.5} and PM₁₀*. *Atmospheric Research*, 312, 107733. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107733>