



IMPLEMENTASI METODE *GEOGRAPHICALLY-TEMPORALLY WEIGHTED REGRESSION* UNTUK ANALISIS SPASIAL PADA PENCEMARAN UDARA KONSENTRASI PM_{2.5} DI PROVINSI DKI JAKARTA

Puspita Anggrainy^{a*}

^a Fakultas MIPA / Jurusan Matematika; anggrainypuspita8@gmail.com, Universitas Pamulang; Jl. Raya Puspiptek No. 46, Serpong, Kota Tangerang Selatan, Banten 15316.

* Penulis Korespondensi: Puspita Anggrainy

ABSTRACT

This study analyzes the spatial-temporal dynamics of PM_{2.5} air pollution in DKI Jakarta using the Geographically-Temporally Weighted Regression (GTWR) approach. The objectives of this study are to evaluate the influence of meteorological factors, compare the performance of the global OLS model with GTWR, and identify spatial-temporal heterogeneity in Central Jakarta and North Jakarta using daily data from 2024. The results show that PM_{2.5} concentrations in both areas exceed WHO and SNI quality standards. The OLS model has limited explanatory power ($R^2 = 0.303$), while GTWR significantly improves accuracy ($R^2 = 0.661-0.723$) with a decrease in RMSE and MAE. Local estimates show that wind speed and humidity have a negative effect, while air temperature and sunshine duration have a positive effect, with temperature as the dominant factor. Differences in optimal bandwidth between regions confirm the existence of spatial-temporal heterogeneity. This study confirms the superiority of GTWR as an analytical framework to support location- and time-based air pollution control policies.

Keywords: PM_{2.5}; GTWR; OLS; air pollution; spatial-temporal analysis; DKI Jakarta.

Abstrak

Penelitian ini menganalisis dinamika spasial-temporal pencemaran udara PM_{2.5} di DKI Jakarta menggunakan pendekatan *Geographically-Temporally Weighted Regression* (GTWR). Tujuan penelitian adalah mengevaluasi pengaruh faktor meteorologis, membandingkan kinerja model global OLS dengan GTWR, serta mengidentifikasi heterogenitas spasial-temporal di Jakarta Pusat dan Jakarta Utara menggunakan data harian tahun 2024. Hasil menunjukkan konsentrasi PM_{2.5} di kedua wilayah melampaui baku mutu WHO dan SNI. Model OLS memiliki daya jelas terbatas ($R^2 = 0,303$), sedangkan GTWR meningkatkan akurasi secara signifikan ($R^2 = 0,661-0,723$) dengan penurunan RMSE dan MAE. Estimasi lokal menunjukkan kecepatan angin dan kelembapan berpengaruh negatif, sedangkan suhu udara dan lama penyinaran berpengaruh positif dengan suhu sebagai faktor dominan. Perbedaan bandwidth optimal antarwilayah mengonfirmasi adanya heterogenitas spasial-temporal. Studi ini menegaskan keunggulan GTWR sebagai kerangka analitik untuk mendukung kebijakan pengendalian polusi udara berbasis lokasi dan waktu.

Kata Kunci: PM_{2.5}; GTWR; OLS; Pencemaran Udara; Spasial-temporal; DKI Jakarta.

1. PENDAHULUAN

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang paling serius karena berdampak luas terhadap kesehatan manusia, keberlanjutan ekosistem, dan perubahan iklim global. *World Health Organization* (WHO) melaporkan bahwa sekitar 99% populasi dunia menghirup udara yang melebihi ambang batas kualitas udara, dengan estimasi 4,2 juta kematian prematur setiap tahun akibat paparan polusi udara ambien [1]. Sumber utama pencemaran udara berasal dari aktivitas industri, sektor transportasi, pembakaran bahan bakar fosil, serta proses alamiah. Di antara berbagai polutan udara, particulate matter berdiameter \leq

2,5 μm ($\text{PM}_{2.5}$) menjadi indikator penting kualitas udara karena kemampuannya menembus sistem pernapasan hingga ke aliran darah dan memicu gangguan pernapasan kronis, penyakit kardiovaskular, serta peningkatan risiko kematian dini [2].

Di tingkat nasional, kualitas udara di Indonesia menunjukkan tren penurunan dalam beberapa tahun terakhir. Pada tahun 2024, konsentrasi rata-rata $\text{PM}_{2.5}$ tercatat sebesar 35,54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan indeks kualitas udara sebesar 101, yang termasuk dalam kategori “tidak sehat bagi kelompok sensitif” [3]. Nilai tersebut sekitar 7,1 kali lebih tinggi dibandingkan ambang batas tahunan yang direkomendasikan WHO. Secara global, Indonesia menempati peringkat ke-15 dari 138 negara dengan tingkat pencemaran udara tertinggi. Secara regional, DKI Jakarta menjadi salah satu kota dengan tingkat pencemaran udara tertinggi, dengan konsentrasi rata-rata $\text{PM}_{2.5}$ sebesar 41,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan indeks kualitas udara sebesar 142, yang menempatkannya sebagai kota paling berpolusi ke-28 di dunia.

Tingginya tingkat pencemaran udara di Jakarta tidak terlepas dari pesatnya pertumbuhan sektor transportasi dan industrialisasi. Jumlah kendaraan bermotor di wilayah Jakarta dan sekitarnya mencapai lebih dari 12 juta unit pada tahun 2024 [4], yang berkontribusi signifikan terhadap peningkatan emisi polutan udara. Selain itu, aktivitas industri, pembakaran limbah terbuka, serta kegiatan konstruksi turut memperburuk kualitas udara perkotaan [5]. Meskipun telah terdapat regulasi seperti Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, implementasi kebijakan pengendalian pencemaran udara masih menghadapi kendala berupa lemahnya pengawasan dan rendahnya kesadaran masyarakat [6].

Pemahaman yang komprehensif terhadap dinamika pencemaran udara memerlukan pendekatan analisis yang mampu menangkap variasi spasial dan temporal secara simultan. Model regresi linier berganda atau *Ordinary Least Squares* (OLS) hanya memberikan estimasi hubungan global dengan asumsi bahwa hubungan antarvariabel bersifat konstan di seluruh wilayah dan waktu pengamatan. *Geographically Weighted Regression* (GWR) telah dikembangkan untuk mengakomodasi heterogenitas spasial, namun belum mempertimbangkan dimensi temporal. Sebagai pengembangan lebih lanjut, *Geographically-Temporally Weighted Regression* (GTWR) memungkinkan pemodelan hubungan antarvariabel yang bervariasi secara spasial dan temporal, sehingga lebih sesuai untuk analisis fenomena lingkungan yang dinamis [7].

Sejumlah penelitian sebelumnya menunjukkan keunggulan GTWR dalam pemodelan polusi udara. Aisyiah [8] menemukan bahwa GTWR menghasilkan estimasi yang lebih akurat dibandingkan model nonspasial dalam analisis konsentrasi PM_{10} di Surabaya. Ilahi [9] menerapkan GTWR untuk estimasi $\text{PM}_{2.5}$ di Jakarta dan menunjukkan bahwa variabel suhu dan kelembapan memiliki pengaruh signifikan dengan performa model yang lebih baik dibandingkan OLS. Studi Liu [10] di wilayah Cina Barat Daya juga membuktikan bahwa GTWR mampu memberikan estimasi $\text{PM}_{2.5}$ yang lebih akurat melalui integrasi data penginderaan jauh dan faktor topografi. Meskipun demikian, penerapan GTWR untuk analisis spasial-temporal $\text{PM}_{2.5}$ di Jakarta masih relatif terbatas, khususnya pada kajian yang menekankan perbedaan karakteristik antarwilayah dan periode waktu.

Berdasarkan kesenjangan penelitian tersebut, studi ini bertujuan mengevaluasi pengaruh faktor meteorologis terhadap konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$ di DKI Jakarta, membandingkan kinerja model OLS dan GTWR, serta mengidentifikasi heterogenitas spasial-temporal konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$ di Jakarta Pusat dan Jakarta Utara. Kebaruan penelitian terletak pada penerapan GTWR untuk mengintegrasikan dimensi spasial dan temporal secara simultan dalam konteks kawasan perkotaan padat di Indonesia, sehingga memungkinkan identifikasi perbedaan karakteristik pencemaran udara antarwilayah dan periode waktu secara lebih presisi dibanding pendekatan global. Temuan penelitian ini diharapkan memperkaya pengembangan metode statistik spasial-terapan sekaligus menyediakan dasar ilmiah bagi perumusan kebijakan pengendalian pencemaran udara berbasis lokasi dan waktu.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Particulate Matter ($\text{PM}_{2.5}$)

$\text{PM}_{2.5}$ (*Particulate Matter* $\leq 2,5 \mu\text{m}$) merupakan partikel halus di udara yang mampu bertahan di atmosfer dalam jangka waktu relatif lama dan menembus hingga alveoli paru-paru manusia. Partikel ini berasal dari sumber primer, seperti emisi kendaraan bermotor dan pembakaran biomassa, serta sumber sekunder melalui proses pembentukan kimiawi di atmosfer yang melibatkan gas prekursor, antara lain sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida (NO_x), dan amonia (NH_3). *World Health Organization* (WHO) mengategorikan $\text{PM}_{2.5}$ sebagai salah satu polutan udara paling berbahaya karena keterkaitannya dengan berbagai gangguan kesehatan serius,

termasuk penyakit kardiovaskular, kanker paru-paru, dan peningkatan risiko kematian dini [1]. Di Indonesia, $PM_{2.5}$ digunakan sebagai indikator utama dalam penilaian kualitas udara, karena konsentrasinya dipengaruhi oleh distribusi spasial sumber emisi, aktivitas harian dan musiman, sifat kimia polutan, serta kondisi meteorologis [11]; [12]; [13]. Secara konseptual, karakter $PM_{2.5}$ yang mudah berpindah lintas wilayah serta sensitif terhadap kondisi atmosfer menyebabkan konsentrasinya jarang bersifat homogen. Artinya, pendekatan analisis yang mengabaikan variasi spasial dan temporal berpotensi menghasilkan estimasi yang bias. Dengan demikian, studi $PM_{2.5}$ tidak hanya memerlukan pemahaman sumber emisi, tetapi juga mekanisme transportasi dan transformasi atmosfer yang dinamis.

2.2. Faktor Meteorologis dalam Dinamika $PM_{2.5}$

Faktor meteorologis berperan dalam proses pembentukan, transformasi, dan dispersi $PM_{2.5}$. Suhu udara memengaruhi laju reaksi fotokimia membentuk partikel sekunder, sedangkan kelembapan memengaruhi higroskopisitas partikel yang berperan dalam proses deposisi atmosfer [9]. Kecepatan angin berfungsi sebagai mekanisme dispersi, sementara lama penyinaran matahari berkontribusi pada intensitas reaksi kimia atmosfer. Namun, hubungan antara variabel meteorologis dan $PM_{2.5}$ bersifat kontekstual, tidak linier, serta berubah antarwilayah dan musim. Variasi ini menunjukkan bahwa pengaruh faktor cuaca tidak bersifat universal, melainkan bergantung pada karakteristik lokal sumber emisi dan kondisi atmosfer [14]. Oleh karena itu, pendekatan statistik yang mengasumsikan hubungan konstan kurang memadai untuk menjelaskan dinamika tersebut.

2.3. Model Regresi dalam Analisis Spasial dan Temporal

Regresi linier global (OLS) banyak digunakan dalam studi lingkungan, tetapi mengasumsikan hubungan antarvariabel bersifat homogen. Pada data pencemaran udara yang heterogen, asumsi ini sering tidak terpenuhi sehingga model global cenderung menyederhanakan dinamika lokal [7]. *Geographically Weighted Regression* (GWR) dikembangkan untuk mengakomodasi variasi spasial melalui pembobotan berbasis lokasi, namun belum mempertimbangkan perubahan hubungan antarvariabel dari waktu ke waktu [8]. *Geographically Temporally Weighted Regression* (GTWR) merupakan pengembangan yang mengintegrasikan dimensi spasial dan temporal dalam fungsi pembobot, sehingga parameter regresi dapat berubah menurut lokasi dan periode waktu [7]. Secara teoritis, pendekatan ini lebih sesuai untuk fenomena lingkungan perkotaan yang dipengaruhi pola musiman, aktivitas manusia, dan distribusi sumber emisi yang dinamis. Dengan demikian, pergeseran dari OLS ke GWR dan GTWR menunjukkan evolusi metodologis dari pendekatan global menuju model yang adaptif terhadap heterogenitas spasial-temporal.

2.4. Penelitian Terdahulu

Penelitian sebelumnya menunjukkan keunggulan GTWR dibandingkan model global dalam analisis polusi udara. Aisyiah [8], menunjukkan peningkatan akurasi estimasi PM_{10} menggunakan GTWR, sementara Ilahi [9] menemukan bahwa suhu dan kelembapan berpengaruh signifikan terhadap $PM_{2.5}$ dengan performa GTWR lebih baik dibanding OLS. Liu [10] juga menegaskan keunggulan integrasi dimensi spasial-temporal dalam meningkatkan akurasi estimasi $PM_{2.5}$. Meskipun demikian, sebagian besar studi masih berfokus pada peningkatan akurasi model, belum banyak yang mengeksplorasi perbedaan karakteristik spasial-temporal antarwilayah perkotaan padat dengan kompleksitas sumber emisi tinggi. Kesenjangan inilah yang menjadi dasar penelitian ini, yaitu menerapkan GTWR untuk mengidentifikasi heterogenitas spasial-temporal $PM_{2.5}$ di Jakarta Pusat dan Jakarta Utara sebagai wilayah dengan karakteristik emisi yang berbeda.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Provinsi DKI Jakarta dengan fokus wilayah kajian di Jakarta Pusat dan Jakarta Utara. Pemilihan kedua wilayah tersebut didasarkan pada ketersediaan data kualitas udara dan data meteorologis yang representatif serta perbedaan karakteristik wilayah. Jakarta Pusat merepresentasikan kawasan perkotaan padat dengan aktivitas transportasi yang tinggi, sedangkan Jakarta Utara merepresentasikan kawasan pesisir dengan dominasi aktivitas pelabuhan dan industri. Data yang digunakan merupakan data harian sepanjang tahun 2024, sehingga memungkinkan analisis variasi spasial dan temporal secara konsisten.

Data konsentrasi $PM_{2.5}$ diperoleh dari Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) melalui portal Satu Data Indonesia yang dikelola Dinas Lingkungan Hidup Provinsi DKI Jakarta, menggunakan Stasiun Bundaran HI (Jakarta Pusat) dan Kelapa Gading (Jakarta Utara). Data meteorologis diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) melalui Stasiun Meteorologi Kemayoran dan Stasiun Meteorologi Maritim Tanjung Priok untuk menjaga kesesuaian spasial titik pengamatan. Variabel terikat adalah

konsentrasi $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), sedangkan variabel bebas meliputi kecepatan angin, kelembapan udara, suhu udara, dan lama penyinaran matahari.

Analisis dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama menggunakan regresi linier global dengan metode Ordinary Least Squares (OLS) untuk memperoleh hubungan umum antara variabel meteorologis dan $PM_{2.5}$. Model OLS dirumuskan sebagai:

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{k=1}^p \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i \quad (1)$$

dengan Y_i menyatakan konsentrasi $PM_{2.5}$, $\beta_k X_{ik}$ merupakan variabel meteorologis ke- k , β_k adalah parameter regresi, dan ε_i adalah galat model.

Tahap kedua menggunakan model *Geographically-Temporally Weighted Regression* (GTWR) untuk menangkap variasi hubungan antarvariabel yang bersifat spasial dan temporal. Model ini merupakan pengembangan GWR dengan penambahan dimensi waktu dalam fungsi pembobotan sehingga parameter regresi bervariasi menurut lokasi dan waktu pengamatan. Model GTWR dirumuskan sebagai:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (2)$$

dengan (u_i, v_i) menyatakan koordinat spasial dan t_i menyatakan waktu pengamatan. Estimasi parameter dilakukan menggunakan pembobotan spasial-temporal berdasarkan fungsi kernel dan *bandwidth* optimum yang ditentukan melalui *Cross Validation* (CV). Evaluasi kinerja model OLS dan GTWR dilakukan menggunakan determinasi (R^2), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolut Error* (MAE) *Akaike Information Criterion* (AIC) untuk menentukan model yang paling sesuai dalam memodelkan konsentrasi $PM_{2.5}$ di wilayah kajian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Statistik Deskriptif Data

Analisis statistik deskriptif menunjukkan bahwa rata-rata konsentrasi $PM_{2.5}$ di Jakarta Utara ($74,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$) lebih tinggi dibandingkan Jakarta Pusat ($71,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Kedua nilai tersebut telah melampaui ambang batas kualitas udara yang ditetapkan oleh *World Health Organization* ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) maupun Standar Nasional Indonesia ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$), sehingga kualitas udara di kedua wilayah tergolong tidak sehat.

Variabel meteorologis menunjukkan karakteristik yang berbeda antarwilayah. Jakarta Utara memiliki kecepatan angin rata-rata yang lebih tinggi serta durasi penyinaran matahari yang lebih panjang, sedangkan Jakarta Pusat memiliki kelembapan udara yang relatif lebih rendah dengan suhu udara yang hampir seragam di kedua wilayah (sekitar 29°C). Secara musiman, konsentrasi $PM_{2.5}$ tertinggi terjadi pada musim kemarau dan terendah pada musim hujan. Pola ini mengindikasikan bahwa kondisi kering memperparah akumulasi polutan, sementara curah hujan dan kelembapan berperan dalam proses deposisi partikel. Variasi spasial dan temporal ini memperkuat relevansi penggunaan pendekatan *Geographically-Temporally Weighted Regression* (GTWR) dalam analisis pencemaran udara perkotaan.

4.2 Uji Asumsi Model Regresi Global

Sebelum dilakukan pemodelan regresi, uji asumsi klasik diterapkan untuk memastikan validitas estimasi parameter pada model regresi linier global. Hasil uji normalitas *Kolmogorov - Smirnov* menunjukkan bahwa residual berdistribusi normal ($p\text{-value} > 0,05$). Uji heteroskedastisitas *Breusch-Pagan* juga menghasilkan $p\text{-value}$ di atas taraf signifikansi 5%, yang mengindikasikan varians residual bersifat homogen.

Selanjutnya, uji multikolinearitas menunjukkan seluruh variabel independen memiliki nilai *Variance Inflation Factor* (VIF) < 2 , sehingga tidak terdapat korelasi tinggi antarvariabel bebas. Uji linearitas menunjukkan bahwa masing-masing variabel meteorologis memiliki hubungan linier yang signifikan dengan konsentrasi $PM_{2.5}$ ($p < 0,05$). Dengan demikian, model regresi global memenuhi seluruh asumsi klasik dan layak digunakan sebagai model pembanding awal.

4.3 Hasil Pemodelan Regresi Linier Global (OLS)

Hasil pemodelan regresi linier global (OLS) menunjukkan bahwa seluruh variabel meteorologis, yaitu kecepatan angin (X_1), kelembapan udara (X_2), suhu udara (X_3), dan lama penyinaran matahari (X_4), berpengaruh signifikan terhadap konsentrasi $PM_{2.5}$ pada taraf signifikansi 5% ($p < 0,05$). Kecepatan angin dan kelembapan udara memiliki koefisien negatif, yang mengindikasikan perannya dalam proses penyebaran dan deposisi partikel. Sebaliknya, suhu udara dan lama penyinaran matahari berpengaruh positif terhadap peningkatan konsentrasi $PM_{2.5}$, yang berkaitan dengan intensifikasi reaksi fotokimia di atmosfer.

Berdasarkan hasil estimasi, persamaan regresi linier global yang diperoleh adalah:

$$\hat{Y} = -77,6984 - 6,1410X_1 - 0,2903X_2 + 5,8842X_3 + 2,1547X_4$$

Uji simultan (F-test) menunjukkan bahwa keempat variabel independen secara bersama-sama berpengaruh signifikan terhadap $PM_{2.5}$ ($F = 78,903$; $p < 0,05$). Namun demikian, nilai koefisien determinasi (R^2) yang dihasilkan relatif moderat, yaitu sebesar 0,303. Hal ini menunjukkan bahwa model OLS hanya mampu menjelaskan sekitar 30,3% variasi konsentrasi $PM_{2.5}$, sementara sisanya dipengaruhi oleh faktor lain seperti sumber emisi lokal, kondisi spasial, dan dinamika temporal yang tidak dapat ditangkap oleh model regresi global.

4.4 Hasil Pemodelan Geographically - Temporally Weighted Regression (GTWR)

4.4.1 Evaluasi Model GTWR

Penerapan model GTWR menghasilkan peningkatan kualitas model yang signifikan dibandingkan regresi global. Perbandingan kinerja model ditunjukkan pada Tabel 4, yang memperlihatkan peningkatan nilai koefisien determinasi (R^2) serta penurunan nilai kesalahan prediksi pada kedua wilayah kajian.

Tabel 1. *Perbandingan Kinerja Model OLS dan GTWR*

Wilayah	Model	R^2	RMSE	MAE
Jakarta Pusat	OLS	0,237	19,808	16,199
	GTWR	0,661	11,536	8,719
Jakarta Utara	OLS	0,429	21,592	17,840
	GTWR	0,723	11,364	8,966

Sumber: Data Penelitian Penulis

Peningkatan nilai R^2 dan penurunan RMSE serta MAE menunjukkan bahwa GTWR lebih efektif dalam menangkap heterogenitas spasial dan temporal konsentrasi $PM_{2.5}$ dibandingkan model OLS. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menekankan pentingnya pemodelan spasial-temporal dalam data lingkungan berpola musiman dan dinamis [15]

4.4.2 Estimasi Parameter Lokal GTWR

Berbeda dengan regresi global yang menghasilkan satu koefisien tetap, model GTWR menghasilkan koefisien regresi lokal yang bervariasi pada setiap lokasi dan waktu pengamatan. Variasi parameter ini memungkinkan interpretasi hubungan antara $PM_{2.5}$ dan faktor meteorologis secara lebih spesifik sesuai karakteristik wilayah.

Tabel 2. *Estimasi Parameter lokal GTWR*

Wilayah	X_1 (Kecepatan Angin)	X_2 (kelembapan udara)	X_3 (suhu udara)	X_4 (sinar matahari)
Jakarta Pusat	-7,104	-0,627	+2,974	+1,799
Jakarta Utara	-9,501	-1,010	+6,139	+1,284

Sumber: Data Penelitian Penulis

Hasil estimasi menunjukkan bahwa kecepatan angin dan kelembapan udara secara umum memiliki pengaruh negatif terhadap konsentrasi $PM_{2.5}$, sedangkan suhu udara dan lama penyinaran matahari menunjukkan pengaruh positif. Perbedaan nilai koefisien antarwilayah mengindikasikan adanya variasi kekuatan dan arah pengaruh variabel meteorologis yang tidak dapat ditangkap oleh model regresi global, sehingga menegaskan keunggulan GTWR dalam memodelkan heterogenitas spasial dan temporal pencemaran udara.

4.4.3 Uji Signifikansi Variabel Lokal

Uji signifikansi parameter lokal pada model GTWR dilakukan menggunakan adjusted t-statistic. Ringkasan hasil pengujian signifikansi variabel pada masing-masing wilayah disajikan pada tabel dibawah ini:

Tabel 3. Uji Signifikansi Parameter Lokal GTWR

Variabel	Jakarta Pusat	Jakarta Utara	Keterangan
X ₁ kecepatan angin	Signifikan	Signifikan	Efek negatif konsisten
X ₂ kelembapan udara	Sebagian	Lemah	Bersifat kontekstual
X ₃ suhu udara	Signifikan	Signifikan	Variabel paling dominan
X ₄ sinar matahari	signifikan	Signifikan	Efek positif moderat

Sumber: Data Penelitian Penulis

Kecepatan angin (X₁) secara konsisten signifikan dan berpengaruh negatif terhadap PM_{2.5} di kedua wilayah, mendukung temuan Luthfirta mengenai peran angin dalam penyebaran polutan atmosfer. Kelembapan udara (X₂) menunjukkan signifikansi parsial dan tidak konsisten secara spasial, sejalan dengan Andri [16] yang menyatakan bahwa pengaruh kelembapan sangat dipengaruhi oleh kondisi musiman dan sumber emisi lokal.

Suhu udara (X₃) merupakan variabel paling dominan dengan pengaruh positif signifikan di seluruh lokasi, mendukung temuan Rizqi et al [17] bahwa peningkatan suhu memperkuat pembentukan partikel sekunder melalui reaksi fotokimia. Lama penyinaran matahari (X₄) juga berpengaruh positif dan signifikan, meskipun kontribusinya relatif lebih kecil dibandingkan suhu udara.

4.5 Evaluasi Bandwidth Spasial - Temporal

Dalam model *Geographically-Temporally Weighted Regression* (GTWR), estimasi parameter lokal dipengaruhi oleh bobot spasial-temporal yang ditentukan berdasarkan jarak geografis dan perbedaan waktu antar titik pengamatan. Bobot tersebut dikendalikan oleh parameter *bandwidth*, yang merepresentasikan sejauh mana pengaruh titik-titik tetangga diperhitungkan dalam estimasi model. Pemilihan bandwidth optimal dilakukan menggunakan metode *Cross Validation* (CV) dengan tujuan meminimalkan kesalahan prediksi model. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai *bandwidth* optimal di Jakarta Utara lebih besar dibandingkan Jakarta Pusat, yaitu masing-masing sebesar 62,0 dan 54,0.

Perbedaan ini mengindikasikan bahwa hubungan spasial-temporal konsentrasi PM_{2.5} di Jakarta Utara bersifat lebih menyebar dan kompleks, sehingga estimasi parameter memerlukan informasi dari lebih banyak titik pengamatan. Kondisi tersebut dapat dikaitkan dengan karakter wilayah Jakarta Utara yang didominasi aktivitas industri dan distribusi sumber emisi yang lebih luas. Sebaliknya, *bandwidth* yang lebih kecil di Jakarta Pusat menunjukkan bahwa pengaruh lokal lebih dominan dan terpusat, sehingga estimasi parameter cukup bergantung pada data di sekitar lokasi dan waktu yang berdekatan. Temuan ini menegaskan adanya perbedaan karakteristik spasial-temporal pencemaran udara antarwilayah serta memperkuat keunggulan GTWR dalam memodelkan dinamika PM_{2.5} di kawasan perkotaan padat seperti DKI Jakarta.

4.6 Implikasi Kebijakan

Temuan penelitian menunjukkan bahwa strategi pengendalian pencemaran udara tidak dapat disamaratakan antarwilayah. Jakarta Utara memerlukan pendekatan pengendalian berbasis wilayah luas dengan fokus pada pengelolaan emisi industri dan aktivitas pelabuhan, sedangkan Jakarta Pusat memerlukan intervensi lokal pada sektor transportasi dan aktivitas perkotaan padat. Pendekatan spasial-temporal seperti GTWR memungkinkan penentuan prioritas kebijakan yang lebih presisi sesuai karakteristik masing-masing wilayah dan periode waktu.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa model GTWR secara signifikan lebih unggul dibandingkan OLS dalam memodelkan konsentrasi PM_{2.5} di DKI Jakarta, dengan peningkatan nilai R² dari 0,303 pada model global menjadi 0,661 di Jakarta Pusat dan 0,723 di Jakarta Utara, serta penurunan kesalahan prediksi. Faktor meteorologis berpengaruh heterogen secara spasial-temporal, dengan suhu udara sebagai variabel paling dominan. Perbedaan bandwidth optimal (54,0 di Jakarta Pusat dan 62,0 di Jakarta Utara) menegaskan adanya perbedaan karakteristik dinamika pencemaran udara antarwilayah. Disarankan agar model GTWR digunakan sebagai alat pendukung kebijakan pengendalian pencemaran udara berbasis lokasi dan waktu, serta penelitian lanjutan mengintegrasikan variabel emisi lalu lintas, industri, dan penggunaan lahan untuk meningkatkan akurasi model.

Ucapan Terima Kasih

Implementasi Metode Geographically-Temporally Weighted Regression Untuk Analisis Spasial Pada Pencemaran Udara Konsentrasi Pm_{2.5} Di Provinsi Dki Jakarta (Puspita Anggrainy)

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Pamulang atas dukungan sarana dan prasarana yang menunjang pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada Dinas Lingkungan Hidup Provinsi DKI Jakarta atas penyediaan data kualitas udara serta Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) atas ketersediaan data meteorologis yang digunakan dalam analisis penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Miles, "WHO global air quality guidelines," *Part. matter (PM2.5 PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide carbon monoxide.*, pp. 1–360, 2021.
- [2] I. Ismiyati, D. Marlita, and D. Saidah, "Pencemaran udara akibat emisi gas buang kendaraan bermotor," *J. Manaj. Transp. Logistik*, vol. 1, no. 3, pp. 241–248, 2014.
- [3] AQI Air, "Kualitas Udara di Indonesia."
- [4] K. Polri, "Electronic Registration Identification."
- [5] A. Pratama and A. Sofyan, "Analisis Dispersi Pencemar Udara PM10 di kota Bandung Menggunakan Wrfchem Data Asimilasi," *J. Tek. Lingkung.*, vol. 26, no. 2, pp. 11–30, 2020.
- [6] Ellitan, "UU No 32 tahun 2009," *Экономика Региона*, vol. 19, no. 19, p. 19, 2009.
- [7] A. S. Fotheringham, B. Lu, M. Charlton, and H. Paul, "Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships (review)," *Geogr. Anal.*, vol. 35, no. 3, pp. 272–275, 2003, doi: 10.1353/geo.2003.0008.
- [8] K. Aisyiah, Sutikno, and I. N. Latra, "Pemodelan Konsentrasi Partikel Debu (PM10) pada Pencemaran di Kota Surabaya dengan Metode Geographically-Temporally Weighted Regression," *J. Sains dan Seni POMITS*, vol. 2, no. 1, pp. 152–157, 2014.
- [9] I. F. N. Ilahi, E. Ferdiansyah, and F. Arifianto, "Pendugaan PM2.5 Menggunakan Metode Geographically Temporally Weighted Regression di DKI Jakarta," *J. Ilmu Lingkung.*, vol. 22, no. 6, pp. 1435–1440, 2024, doi: 10.14710/jil.22.6.1435-1440.
- [10] L. Liu *et al.*, "Remote sensing estimation of regional PM2.5 based on GTWR model-A case study of southwest China," *Environ. Pollut.*, vol. 351, p. 124057, 2024.
- [11] R. A. Regia, V. S. Bachtiar, and R. Solihin, "Analisis Risiko Kesehatan Akibat Paparan Particulate Matter 2,5 (PM2,5) Dalam Rumah Tinggal di Perumahan X Kawasan Industri Semen," *J. Ilmu Lingkung.*, vol. 19, no. 3, pp. 531–540, 2021, doi: 10.14710/jil.19.3.531-540.
- [12] S. Arba, "Dust Respirable Concentration 'Particulate Matter' (Pm2.5) And Health Disorders Communities In Settlement Around Electric Steam Power Plant," *Promot. Kesehat. Masy.*, vol. 9, no. Vol. 9 No. 2: DESEMBER 2019, pp. 178–184, 2019.
- [13] C. A. Pope Iii *et al.*, "Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution," *Jama*, vol. 287, no. 9, pp. 1132–1141, 2002.
- [14] D. Ruhiat and A. Effendi, "Pengaruh Faktor Musiman Pada Pemodelan Deret Waktu Untuk Peramalan Debit Sungai Dengan Metode Sarima," *Teorema*, vol. 2, no. 2, p. 117, 2018, doi: 10.25157/v2i2.1075.
- [15] J. H. Seinfeld and S. N. Pandis, *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, 2016.
- [16] S. N. H. F. S. Andri, "Eksplorasi Fluktuasi Konsentrasi PM2.5 di Provinsi Daerah Khusus Jakarta Selama Oktober 2022," pp. 601–607, 2024.
- [17] I. Rizqi, I. P. Santikayasa, and A. Turyanti, "Analisis Pengaruh Faktor Meteorologi terhadap Fluktuasi Analysis of the Influence of Meteorological Factors on Concentration Fluctuation of???.? in Pontianak City," vol. 15, no. 1, pp. 24–33, 2025, doi: 10.26418/positron.v15i1.91566.

NOMENKLATUR

Y_i	: nilai konsentrasi PM _{2.5} pada observasi ke- i
\hat{Y}_i	: nilai prediksi konsentrasi PM _{2.5} pada observasi ke- i
β_0	: intersep (konstanta) pada model regresi
β_k	: koefisien regresi untuk variabel independen ke- k
$\beta_k(u_i, v_i, t_i)$: koefisien regresi lokal variabel ke- k pada lokasi dan waktu tertentu dalam model GTWR
X_{ik}	: nilai variabel independen ke- k pada observasi ke- i
k	: indeks variabel independen, dengan $k = 1, 2, \dots, p$
p	: jumlah variabel independen dalam model
ε_i	: galat (error term) pada observasi ke- i
u_i	: koordinat geografis bujur (longitude) pada lokasi observasi ke- i

v_i : koordinat geografis lintang (latitude) pada lokasi observasi ke- i
 t_i : waktu pengamatan pada observasi ke- i