

**ANALISIS SPASIAL-TEMPORAL PENCEMARAN UDARA PM<sub>2.5</sub> DI PROVINSI JAWA BARAT  
DENGAN PENDEKATAN GEOGRAPHICALLY-TEMPORALLY WEIGHTED REGRESSION****Dyah Trianna<sup>a\*</sup>**Program Studi Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pamulang, JL. Raya  
Puspitek, Kota Tangerang Selatan, Banten, Indonesia

\* Penulis Korespondensi: Dyah Trianna

**ABSTRACT**

*Air pollution remains a critical environmental issue in West Java Province, particularly due to elevated PM<sub>2.5</sub> concentrations that pose serious risks to public health. This study aims to examine the spatial–temporal variability of PM<sub>2.5</sub> concentrations using the Geographically Temporally Weighted Regression (GTWR) approach by incorporating wind speed, air humidity, and average temperature as predictor variables. The analysis utilizes air quality monitoring data from Bandung City and Bogor City collected between March and May 2024. GTWR is employed to capture local spatial and temporal variations that cannot be adequately explained by global Ordinary Least Squares (OLS) regression. The results indicate a substantial improvement in model performance when using GTWR, with the coefficient of determination increasing from 0.066 to 0.718 in Bandung City and from 0.068 to 0.694 in Bogor City. Wind speed demonstrates a significant negative effect on PM<sub>2.5</sub> concentrations, while air humidity and average temperature exhibit negative but statistically insignificant relationships. These findings confirm that GTWR provides a more effective framework for modeling spatial–temporal air pollution patterns and offers enhanced insights into localized PM<sub>2.5</sub> dynamics in urban areas..*

**Keywords:** *Air pollution; GTWR; PM<sub>2.5</sub>; spatial–temporal regression; West Java***ABSTRAK**

Pencemaran udara masih menjadi permasalahan lingkungan yang serius di Provinsi Jawa Barat, terutama terkait tingginya konsentrasi Particulate Matter berukuran  $\leq 2,5 \mu\text{m}$  (PM<sub>2.5</sub>) yang berdampak buruk terhadap kesehatan masyarakat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis variasi spasial dan temporal konsentrasi PM<sub>2.5</sub> menggunakan metode Geographically Temporally Weighted Regression (GTWR) dengan mempertimbangkan kecepatan angin, kelembapan udara, dan temperatur rata-rata sebagai variabel prediktor. Data yang digunakan berasal dari stasiun pemantauan kualitas udara di Kota Bandung dan Kota Bogor selama periode Maret hingga Mei 2024. Metode GTWR diterapkan untuk menangkap variasi lokal berdasarkan perbedaan lokasi dan waktu yang tidak dapat dijelaskan secara optimal oleh model regresi linier global (Ordinary Least Squares). Hasil analisis menunjukkan bahwa model GTWR memberikan peningkatan kinerja yang signifikan dibandingkan model global, ditunjukkan oleh kenaikan koefisien determinasi dari 0,066 menjadi 0,718 di Kota Bandung dan dari 0,068 menjadi 0,694 di Kota Bogor. Kecepatan angin memiliki pengaruh negatif dan signifikan terhadap konsentrasi PM<sub>2.5</sub>, sedangkan kelembapan udara dan temperatur rata-rata menunjukkan hubungan negatif namun tidak signifikan secara statistik. Temuan ini menegaskan bahwa metode GTWR lebih efektif dalam memodelkan dinamika spasial dan temporal pencemaran udara, serta mampu memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pola lokal konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di wilayah perkotaan.

**Kata Kunci:** pencemaran udara; GTWR; PM<sub>2.5</sub>; regresi spasial-temporal; Jawa Barat

## 1. PENDAHULUAN

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang semakin mendapat perhatian, khususnya di wilayah perkotaan dengan aktivitas antropogenik yang tinggi. Salah satu polutan udara yang berbahaya adalah Particulate Matter berukuran  $\leq 2,5 \mu\text{m}$  (PM<sub>2.5</sub>) karena mampu menembus saluran pernapasan bagian dalam dan berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan, seperti penyakit pernapasan dan kardiovaskular. Provinsi Jawa Barat, sebagai wilayah dengan tingkat urbanisasi, kepadatan penduduk, dan mobilitas yang tinggi, menghadapi permasalahan serius terkait peningkatan konsentrasi PM<sub>2.5</sub>, terutama di kota-kota besar seperti Kota Bandung dan Kota Bogor.

Particulate Matter berukuran halus (PM<sub>2.5</sub>) merupakan salah satu polutan udara yang berbahaya karena dapat masuk ke dalam sistem pernapasan dan peredaran darah, serta berkontribusi terhadap meningkatnya risiko gangguan kesehatan masyarakat [1]. Variasi konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dipengaruhi oleh berbagai faktor meteorologis, di antaranya kecepatan angin, kelembapan udara, dan temperatur. Selain itu, karakteristik pencemaran udara bersifat tidak homogen secara spasial maupun temporal, sehingga hubungan antara PM<sub>2.5</sub> dan faktor-faktor yang memengaruhinya dapat berbeda antar lokasi dan periode waktu tertentu. Pendekatan regresi linier global, seperti Ordinary Least Squares (OLS), sering digunakan untuk menganalisis hubungan tersebut, namun memiliki keterbatasan karena mengasumsikan hubungan yang konstan di seluruh wilayah dan waktu pengamatan.

Untuk mengakomodasi adanya heterogenitas spasial, metode Geographically Weighted Regression (GWR) dikembangkan guna menangkap variasi hubungan lokal antar variabel. Selanjutnya, metode Geographically Temporally Weighted Regression (GTWR) diperkenalkan sebagai pengembangan GWR dengan memasukkan dimensi waktu, sehingga mampu memodelkan variasi spasial dan temporal secara simultan. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa GTWR memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan regresi global dalam menganalisis fenomena lingkungan yang bersifat dinamis, termasuk pencemaran udara, karena mampu menangkap perubahan hubungan antar variabel berdasarkan lokasi dan waktu [2]

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa metode Geographically and Temporally Weighted Regression (GTWR) mampu menangkap variasi spasial dan temporal secara lebih baik dibandingkan model regresi global, seperti yang ditunjukkan oleh Febrianti [3] dalam pemodelan kejadian pneumonia pada balita di Kota Bandung. Sementara itu, penerapan metode GTWR untuk menganalisis konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di wilayah Jawa Barat masih relatif terbatas, khususnya yang membandingkan karakteristik antar kota dalam periode waktu tertentu. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis variasi spasial dan temporal konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di Kota Bandung dan Kota Bogor menggunakan metode Geographically Temporally Weighted Regression dengan mempertimbangkan kecepatan angin, kelembapan udara, dan temperatur rata-rata sebagai variabel prediktor. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai pola lokal pencemaran udara serta menjadi dasar ilmiah dalam upaya pengelolaan kualitas udara berbasis spasial dan temporal.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Pencemaran Udara dan PM<sub>2.5</sub>

Particulate Matter berukuran  $\leq 2,5 \mu\text{m}$  (PM<sub>2.5</sub>) merupakan salah satu parameter utama dalam penilaian kualitas udara karena ukurannya yang sangat kecil memungkinkan partikel tersebut masuk hingga ke paru-paru dan aliran darah. Paparan PM<sub>2.5</sub> dalam jangka panjang diketahui berhubungan dengan peningkatan risiko penyakit pernapasan dan kardiovaskular. Konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di wilayah perkotaan umumnya dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik seperti transportasi dan industri, serta kondisi meteorologis setempat yang memengaruhi proses dispersi polutan [4].

#### 2.1.1. Pengaruh Faktor Meteorologis terhadap PM<sub>2.5</sub>

Variasi konsentrasi PM<sub>2.5</sub> tidak hanya dipengaruhi oleh sumber emisi, tetapi juga oleh faktor meteorologis. Kecepatan angin berperan dalam proses dispersi polutan, di mana kecepatan angin yang lebih tinggi cenderung menurunkan konsentrasi PM<sub>2.5</sub>. Sementara itu, kelembapan udara dan temperatur memengaruhi pembentukan serta akumulasi partikel di atmosfer.

#### 2.1.2. Regresi Linier Global dan Keterbatasannya

Pendekatan regresi linier global, seperti Ordinary Least Squares (OLS), sering digunakan untuk menganalisis hubungan antara PM<sub>2.5</sub> dan variabel meteorologis. Namun, model ini mengasumsikan bahwa hubungan antar

variabel bersifat konstan di seluruh wilayah dan waktu pengamatan. Asumsi tersebut sering kali tidak terpenuhi pada data lingkungan yang memiliki karakteristik heterogen secara spasial dan temporal, sehingga model global kurang mampu menggambarkan variasi lokal secara akurat.

### 2.1.3. Geographically Temporally Weighted Regression (GTWR)

Sebagai pengembangan dari Geographically Weighted Regression (GWR), metode Geographically Temporally Weighted Regression (GTWR) dirancang untuk menangkap variasi hubungan antar variabel yang dipengaruhi oleh lokasi dan waktu secara simultan. GTWR memungkinkan koefisien regresi berubah mengikuti dimensi spasial dan temporal, sehingga lebih sesuai untuk memodelkan fenomena lingkungan yang bersifat dinamis. [2] menunjukkan bahwa GTWR memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan regresi global dalam menjelaskan variasi spasial dan temporal pada data lingkungan. Oleh karena itu, metode GTWR dianggap relevan untuk digunakan dalam analisis konsentrasi PM<sub>2.5</sub> yang menunjukkan perbedaan karakteristik antar wilayah dan periode waktu.

## 3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan analisis regresi spasial-temporal untuk memodelkan konsentrasi PM<sub>2.5</sub>. Lokasi penelitian meliputi Kota Bandung dan Kota Bogor yang merupakan wilayah perkotaan di Provinsi Jawa Barat dengan karakteristik geografis dan tingkat aktivitas antropogenik yang berbeda. Periode pengamatan dibatasi pada bulan Maret hingga Mei 2024, dengan mempertimbangkan ketersediaan data yang memenuhi asumsi analisis.

Data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari stasiun pemantauan kualitas udara di masing-masing kota. Variabel respon dalam penelitian ini adalah konsentrasi PM<sub>2.5</sub>, sedangkan variabel prediktor meliputi kecepatan angin, kelembapan udara, dan temperatur rata-rata. Seluruh data disusun dalam format spasial-temporal dengan menggabungkan informasi lokasi geografis dan waktu pengamatan.

Tahapan analisis diawali dengan analisis deskriptif untuk menggambarkan karakteristik data PM<sub>2.5</sub> dan variabel meteorologis pada masing-masing wilayah penelitian. Selanjutnya, dilakukan pemodelan menggunakan regresi linier global Ordinary Least Squares (OLS) sebagai model pembanding awal. Model OLS digunakan untuk mengevaluasi hubungan global antara PM<sub>2.5</sub> dan variabel prediktor tanpa mempertimbangkan variasi spasial dan temporal.

Selanjutnya, pemodelan dilakukan menggunakan metode Geographically Temporally Weighted Regression (GTWR) untuk menangkap variasi hubungan lokal berdasarkan dimensi spasial dan temporal secara simultan. Estimasi parameter GTWR dilakukan dengan memberikan bobot yang berbeda pada setiap lokasi dan waktu pengamatan, sehingga koefisien regresi dapat bervariasi secara lokal. Kinerja model dievaluasi dengan membandingkan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) antara model OLS dan GTWR. Model dengan nilai  $R^2$  yang lebih tinggi dianggap memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menjelaskan variasi konsentrasi PM<sub>2.5</sub>.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Perbandingan kinerja Model OLS dan GTWR

Pemodelan awal menggunakan regresi linier global Ordinary Least Squares (OLS) dilakukan sebagai pembanding terhadap model GTWR. Hasil evaluasi kinerja model menunjukkan bahwa OLS memiliki kemampuan yang sangat terbatas dalam menjelaskan variasi konsentrasi PM<sub>2.5</sub> di kedua wilayah penelitian.

Sebaliknya, penerapan metode Geographically Temporally Weighted Regression (GTWR) menghasilkan peningkatan kinerja model yang signifikan. Hal ini ditunjukkan oleh kenaikan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) pada kedua wilayah, yang menandakan bahwa GTWR lebih mampu menangkap heterogenitas spasial dan temporal pada data PM<sub>2.5</sub>.

Table 1. Perbandingan Nilai Koefisien Determinasi ( $R^2$ )

Wilayah	Model	$R^2$
Kota Bandung	OLS	0,066
Kota Bandung	GTWR	0,718
Kota Bogor	OLS	0,068

Kota Bogor GTWR 0,694

Sumber : Hasil Data Penelitian Penulis

Peningkatan nilai  $R^2$  pada model GTWR menunjukkan bahwa asumsi hubungan global pada model OLS tidak mampu merepresentasikan kompleksitas hubungan antara  $PM_{2.5}$  dan faktor meteorologis. Dengan demikian, GTWR terbukti lebih sesuai untuk memodelkan fenomena pencemaran udara yang bersifat dinamis secara spasial dan temporal.

**4.2 Pengaruh Variabel Meteorologis terhadap Konsentrasi  $PM_{2.5}$**

Hasil estimasi parameter GTWR menunjukkan bahwa kecepatan angin memiliki pengaruh  $\beta$  variabel dan signifikan terhadap konsentrasi  $PM_{2.5}$  di Kota Bandung dan Kota Bogor. Kondisi ini mengindikasikan bahwa peningkatan kecepatan angin berperan dalam mempercepat proses  $\beta$  variabel polutan di atmosfer, sehingga menurunkan konsentrasi  $PM_{2.5}$ .

Sementara itu,  $\beta$  variabel kelembapan udara dan  $\beta$  variabel  $T_{rata-rata}$  menunjukkan arah hubungan  $\beta$  variabel terhadap  $PM_{2.5}$ , namun tidak signifikan secara  $\beta$  variabel. Meskipun demikian, variasi nilai koefisien  $\beta$  variabel dari waktu ke waktu mengindikasikan bahwa pengaruh kedua  $\beta$  variabel tersebut tidak bersifat seragam sepanjang periode pengamatan.

Table 2. Ringkasan Arah Pengaruh dan Signifikansi Variabel

Variabel	Arah Pengaruh	Signifikansi
Kecepatan angin	Negatif	Signifikan
Kelembapan udara	Negatif	Tidak Signifikan
Temperatur rata-rata	Negatif	Tidak Signifikan

Sumber : Hasil Data Penelitian Penulis

**4.3 Variasi Temporal Koefisien Model GTWR**

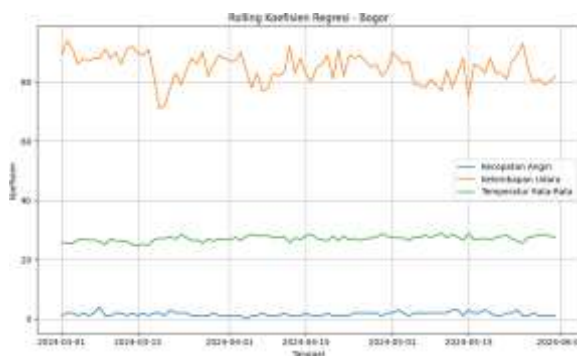
Untuk mengamati dinamika temporal pengaruh variabel meteorologis terhadap  $PM_{2.5}$ , dilakukan analisis rolling regression sebagai pendekatan visual terhadap perubahan koefisien regresi dari waktu ke waktu. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai koefisien mengalami fluktuasi selama periode pengamatan, baik di Kota Bandung maupun Kota Bogor.

Fluktuasi ini menegaskan bahwa hubungan antara  $PM_{2.5}$  dan faktor meteorologis bersifat tidak stasioner secara temporal. Kondisi tersebut tidak dapat ditangkap oleh model regresi global, namun dapat diakomodasi oleh pendekatan GTWR. Berikut merupakan Perubahan nilai koefisien regresi  $PM_{2.5}$  terhadap variabel meteorologis berdasarkan analisis rolling regression di Kota Bandung dan Kota Bogor.



Gambar 1. Rolling Regresi – Bandung

Sumber : Hasil Data Penelitian Penulis



Gambar 2. Rolling Regresi – Bogor  
Sumber : Hasil Data Penelitian Penulis

Hasil grafik rolling regression menunjukkan bahwa hubungan antara variabel meteorologis dan konsentrasi PM2.5 bersifat tidak konstan secara temporal, baik di Kota Bandung maupun Kota Bogor. Pada kedua wilayah, kelembapan udara merupakan variabel yang memberikan kontribusi paling dominan terhadap PM2.5, diikuti oleh temperatur rata-rata, sementara kecepatan angin menunjukkan pengaruh yang relatif paling kecil. Di Kota Bandung, koefisien kelembapan udara cenderung lebih stabil sepanjang periode pengamatan, sedangkan di Kota Bogor koefisien kelembapan menunjukkan fluktuasi yang lebih besar. Perbedaan pola tersebut mengindikasikan bahwa pengaruh faktor meteorologis terhadap PM2.5 di Bogor bersifat lebih variatif secara waktu dibandingkan dengan Bandung. Temuan ini menegaskan bahwa hubungan antara PM2.5 dan variabel meteorologis tidak bersifat statis, sehingga pendekatan yang mampu menangkap dinamika temporal, seperti GTWR, menjadi lebih relevan dibandingkan model regresi global.

#### 4.4 Pembahasan

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa metode GTWR memiliki kinerja yang jauh lebih baik dibandingkan regresi linier global dalam memodelkan konsentrasi PM2.5. Kemampuan GTWR dalam menangkap variasi hubungan antar variabel berdasarkan dimensi waktu memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap dinamika pencemaran udara di wilayah perkotaan. Temuan ini sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa faktor meteorologis berperan penting dalam variasi konsentrasi PM2.5 di wilayah perkotaan [5].

Perbedaan karakteristik temporal antara Kota Bandung dan Kota Bogor menunjukkan bahwa strategi pengendalian pencemaran udara tidak dapat diseragamkan, melainkan perlu disesuaikan dengan kondisi lokal dan waktu tertentu. Oleh karena itu, penggunaan model spasial-temporal seperti GTWR menjadi penting sebagai dasar analisis ilmiah dalam mendukung kebijakan pengelolaan kualitas udara yang lebih adaptif.

#### 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa metode Geographically-Temporally Weighted Regression (GTWR) memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan regresi linier global (Ordinary Least Squares) dalam memodelkan konsentrasi PM2.5 di wilayah perkotaan Provinsi Jawa Barat. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan nilai koefisien determinasi yang signifikan pada kedua wilayah penelitian, yaitu dari 0,066 menjadi 0,718 di Kota Bandung dan dari 0,068 menjadi 0,694 di Kota Bogor. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa GTWR mampu menangkap heterogenitas hubungan antara PM2.5 dan faktor meteorologis yang bersifat spasial dan temporal, yang tidak dapat dijelaskan secara memadai oleh model regresi global. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa kecepatan angin memiliki pengaruh yang signifikan terhadap konsentrasi PM2.5, sementara kelembapan udara dan temperatur rata-rata menunjukkan kontribusi yang bervariasi secara temporal. Oleh karena itu, penggunaan metode GTWR disarankan sebagai pendekatan analisis yang lebih representatif untuk memahami dinamika pencemaran udara berbasis ruang dan waktu. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas cakupan wilayah dan periode pengamatan serta menambahkan variabel pendukung lainnya, seperti curah hujan, kepadatan lalu lintas, atau aktivitas industri, guna meningkatkan kemampuan model dalam menjelaskan variasi konsentrasi PM2.5 dan mendukung perumusan kebijakan pengendalian pencemaran udara yang lebih adaptif.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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.
- [2] B. Huang, B. Wu, and M. Barry, “Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices,” *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, vol. 24, no. 3, pp. 383–401, 2010, doi: 10.1080/13658810802672469.
- [3] L. Febrianti, Y. Andriyana, and D. Y. Faidah, “Pemodelan dan Pemetaan Kejadian Pneumonia pada Balita di Kota Bandung menggunakan Metode Geographically and Temporally Weighted Regression ( GTWR ),” *E-Journal BIAStatistics \ Dep. Stat. FMIPA Univ. Padjajaran*, vol. 6274, no. 2, pp. 277–295, 2023, [Online]. Available: <http://biastatistics.statistics.unpad.ac.id/index.php/biastatistics/article/view/226/229>
- [4] World Health Organization (WHO) 2023, “2 | 2023 World Air Quality Report”.
- [5] Y. Zhan *et al.*, “Spatiotemporal prediction of continuous daily PM2.5 concentrations across China using a spatially explicit machine learning algorithm,” *Atmos. Environ.*, vol. 155, pp. 129–139, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.02.023>.