

DINAMIKA SPASIAL-TEMPORAL POLUSI NITROGEN DIOKSIDA (NO₂) DAN FAKTOR PENENTUNYA DI REGIONAL JAWA

Ayub Abdul Rahman^{1*}, Doddy Aditya Iskandar²

^{1,2}Program Studi Magister Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

*Email Koresponden: ayub.rahman@bps.go.id

Diterima: 08-12-2025, Revisi: 20-01-2026, Disetujui: 22-01-2026

©2026 Universitas Hamzanwadi

Abstrak. Peningkatan konsentrasi gas nitrogen dioksida (NO₂) mencerminkan pesatnya pertumbuhan ekonomi dan industrialisasi di regional Jawa. Namun demikian, kondisi ini perlu dikendalikan agar tidak menimbulkan dampak negatif yang berlebihan terhadap biaya kesehatan masyarakat maupun upaya pemulihian kualitas lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi variasi spasial-temporal pengaruh rata-rata lama sekolah, PDRB per kapita, pengeluaran per kapita, serta persentase *green jobs* terhadap tingkat polusi NO₂ pada 119 kabupaten/kota di regional Jawa dengan menggunakan pendekatan analisis *Geographically Weighted Panel Regression* (GWPR). Data yang digunakan adalah data panel selama periode 2018-2023 yang bersumber dari Badan Pusat Statistik dan citra satelit Sentinel-5P/TROPOMI. Hasil analisis menunjukkan adanya heterogenitas spasial antardaerah dalam menjelaskan perkembangan tingkat polusi NO₂. Konsentrasi tertinggi polusi NO₂ terjadi di daerah dengan tingkat industrialisasi yang tinggi seperti di sekitar kawasan metropolitan Jabodetabek, Gerbangkertosusila, Kota Bandung dan Kota Semarang. Terbentuk beberapa klaster daerah yang signifikan secara statistik pada tiap variabel yang menggambarkan bahwa tingkat polusi NO₂ tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik sosial ekonomi, tetapi juga oleh keterkaitan spasial antardaerah. Temuan penelitian ini menegaskan pentingnya perumusan strategi kebijakan yang berfokus pada peningkatan kapasitas SDM melalui pendidikan, penerapan pertumbuhan ekonomi yang berbasis keberlanjutan, serta peningkatan implementasi ekonomi hijau.

Kata kunci: Polusi udara, Nitrogen Dioksida, GWPR, *Green Jobs*, Spasial-temporal

Abstract. The increase in nitrogen dioxide (NO₂) concentrations reflects rapid economic growth and industrialization in the Java region, posing challenges to public health and environmental sustainability. This study aims to examine the spatio-temporal variation in the effects of average years of schooling, GRDP per capita, expenditure per capita, and the share of green jobs on NO₂ pollution across 119 regencies/cities in Java using a Geographically Weighted Panel Regression (GWPR) approach. Panel data for the period 2018–2023 are obtained from Statistics Indonesia and Sentinel-5P/TROPOMI satellite imagery. The results reveal significant spatial heterogeneity in NO₂ pollution dynamics, with the highest concentrations observed in highly industrialized metropolitan areas such as Jabodetabek, Gerbangkertosusila, and Semarang. Statistically significant regional clusters indicate that NO₂ pollution is influenced not only by local socioeconomic characteristics, but also by spatial interdependencies among regions. These findings highlight the importance of policy strategies focused on strengthening human capital through education, promoting sustainable economic growth, and enhancing the implementation of green economy initiatives.

Keywords: Air pollution, Nitrogen dioxide, GWPR, *Green jobs*, Spatial-temporal

PENDAHULUAN

Pertumbuhan ekonomi yang pesat serta meningkatnya industrialisasi di regional Jawa telah memicu penurunan kualitas lingkungan termasuk kualitas udara. Salah satu dampak dari peningkatan aktivitas ekonomi terhadap kualitas udara ialah meningkatnya konsentrasi gas nitrogen dioksida (NO₂), yang dikenal sebagai salah satu polutan udara berbahaya (WHO, 2021). Selain berdampak pada penurunan kualitas lingkungan, polusi NO₂ juga dianggap berbahaya karena berkontribusi terhadap penurunan kondisi kesehatan masyarakat seperti gangguan kesehatan pernafasan (Parmitasari &

Widayani, 2022). Apabila tidak dikendalikan, tingginya tingkat polusi dapat memicu peningkatan beban pada biaya kesehatan, sehingga secara tidak langsung dapat menurunkan produktivitas masyarakat.

Studi secara spasial menunjukkan bahwa polusi NO_2 membentuk pola aglomerasi, dimana konsentrasi NO_2 cenderung tinggi di daerah pusat yang merupakan zona industri dan rendah di daerah dengan ketinggian yang lebih tinggi atau vegetasi yang lebat (Guo et al., 2022). Selain itu, konsentrasi NO_2 ditemukan lebih tinggi di daerah dengan kepadatan penduduk yang tinggi (Rahman et al., 2023). Kondisi demikian cukup relevan dengan regional Jawa yang memiliki kapasitas sebagai pusat kegiatan ekonomi nasional, memiliki ciri tingkat urbanisasi yang tinggi serta perkembangan industri yang masif. Di sisi lain, regional Jawa memiliki banyak daerah pegunungan yang cenderung memiliki tingkat vegetasi yang tinggi sehingga berpengaruh terhadap rendahnya polusi NO_2 . Perbedaan karakteristik spasial tersebut menunjukkan bahwa dinamika polusi NO_2 tidak bersifat homogen.

Selain faktor spasial, faktor sosial dan ekonomi juga memengaruhi dinamika polusi NO_2 . Secara konseptual, *human capital* pada aspek pendidikan berperan untuk memperbaiki kualitas lingkungan. Pendidikan yang tinggi cenderung berkontribusi terhadap penurunan tingkat emisi atau polusi pada periode jangka panjang (Zouine et al., 2024). Di sisi lain, pendidikan yang tinggi juga meningkatkan kesadaran akan perilaku ramah lingkungan, sehingga membantu memitigasi timbulnya polusi yang tinggi (Alam & Zakaria, 2021). Sementara itu, faktor ekonomi sering menjadi fokus utama dalam pembahasan karena dianggap memiliki peran besar terhadap peningkatan polusi NO_2 . Li et al. (2021) menyatakan adanya kecenderungan hubungan yang positif antara polusi udara dengan pertumbuhan ekonomi. Peningkatan polusi udara merupakan wujud dari pertumbuhan ekonomi yang pada akhirnya membuat banyak penduduk keluar dari garis kemiskinan (Zheng & Khan, 2017). Selain itu, PDB per kapita sebagai cerminan indikator pembangunan ekonomi kerap menunjukkan hubungan yang signifikan positif terhadap peningkatan NO_2 (Han et al., 2021). Sejalan dengan hal tersebut, tingkat konsumsi per kapita yang lebih tinggi juga memicu peningkatan pemakaian energi yang berimbang pada peningkatan emisi atau polusi (Amalina et al., 2023). Penduduk dengan pendapatan yang rendah

Berbagai literatur terdahulu juga telah membahas dinamika polusi NO_2 baik dikaitkan dengan faktor spasial maupun sosial ekonomi. Majid et al. (2025) menelaah faktor-faktor yang memengaruhi distribusi spasial-temporal konsentrasi gas NO_2 di wilayah Jawa Timur, dan mendapati bahwa daerah dengan aktivitas industri dan transportasi yang tinggi, serta tingkat urbanisasi yang lebih tinggi meningkatkan risiko polusi di daerah tersebut. Mustansar et al. (2025) meneliti tentang kesenjangan sosioekonomi terhadap keterpaparan polusi udara. Temuan penelitiannya menunjukkan bahwa tingkat pendidikan orang tua serta lingkungan pendapatan yang lebih rendah meningkatkan kecenderungan anak-anak terpapar polusi yang lebih tinggi.

Meskipun demikian, penelitian yang lebih mutakhir masih dibutuhkan untuk mengkaji dinamika polusi NO_2 dengan mengintegrasikan pengaruh faktor spasial dan sosial ekonomi agar lingkup pembahasan menjadi lebih mendalam. Selain itu, berdasarkan strategi mitigasi dari penelitian Majid et al. (2025), perlu penerapan kebijakan yang bersifat hijau untuk mengurangi polusi NO_2 di masa mendatang. Oleh karena itu, studi terbaru dengan mengintegrasikan faktor lingkungan perlu dilakukan untuk mendapatkan gambaran mengenai efektivitas implementasi ekonomi hijau di Indonesia dalam mengurangi polusi. Dalam hal ini, *green jobs* merupakan salah satu indikator lingkungan yang dapat mencerminkan pembangunan ekonomi hijau. *Green jobs* merupakan bentuk investasi hijau yang berfungsi untuk mengurangi tingkat pengangguran serta meningkatkan kompetensi dan taraf pendidikan masyarakat (BAPPENAS, 2022).

Berdasarkan berbagai uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi variasi spasial-temporal dari variabel rata-rata lama sekolah, PDRB per kapita, pengeluaran per kapita, dan persentase *green jobs* terhadap tingkat polusi NO_2 kabupaten/kota yang ada di regional Jawa. Data yang digunakan tersedia selama periode 2018-2023. Temuan penelitian diharapkan dapat menjadi salah satu dasar kebijakan terkait mitigasi penanganan polusi udara yang lebih tepat sasaran.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk mengidentifikasi variasi spasial-temporal setiap variabel independen terhadap tingkat polusi NO_2 . Unit analisis dalam penelitian ini

yaitu 119 kabupaten/kota yang ada di regional Jawa, mencakup kabupaten/kota yang ada di Pulau Jawa, Pulau Madura, serta Kabupaten Kepulauan Seribu. Variabel penelitian yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari tingkat polusi NO_2 sebagai variabel dependen, serta rata-rata lama sekolah, PDRB per kapita, pengeluaran per kapita, dan persentase *green jobs* sebagai variabel independen. Dalam hal ini, variabel rata-rata lama sekolah mewakili aspek sosial, variabel PDRB per kapita dan pengeluaran per kapita mewakili aspek ekonomi, sedangkan variabel persentase *green jobs* mewakili aspek lingkungan.

Data yang dikumpulkan sebagian besar bersumber dari publikasi tahunan Badan Pusat Statistik (BPS), seperti rata-rata lama sekolah, PDRB per kapita, dan pengeluaran per kapita tingkat kabupaten/kota selama periode 2018-2023. Untuk kebutuhan analisis, data PDRB per kapita dan pengeluaran per kapita ditransformasikan menjadi bentuk logaritma natural agar varian data tidak terlalu besar. Data persentase *green jobs* diolah dari data mentah hasil Survei Angkatan Kerja Nasional (Sakernas) yang diselenggarakan oleh BPS pada periode Agustus setiap tahunnya. Definisi *green jobs* mengacu pada definisi ILO (2016) yaitu pekerjaan layak yang berkontribusi terhadap pelestarian lingkungan. Penentuan klasifikasi *green jobs* menggunakan klasifikasi dari BPS dan BAPPENAS, yang merujuk pada *Green Task Intensity* (GTI), yang telah disesuaikan dengan *International Standard Classification of Occupation* (ISCO) 2008 dan Klasifikasi Baku Jabatan Usaha Indonesia (KBJI) 2014. Sementara itu, data tingkat polusi NO_2 diambil melalui citra satelit Sentinel-5P/TROPOMI (*TROPOspheric Monitoring Instrument*) yang diakses melalui *platform google earth engine*. Dataset yang diambil pada *platform* tersebut merupakan data harian konsentrasi gas nitrogen dioksida selama periode 1 Januari hingga 31 Desember dari tahun 2019 hingga 2023. Untuk tahun 2018, data dikumpulkan dalam rentang waktu 1 Juli hingga 31 Desember 2018 karena dataset yang terbatas. Tahapan selanjutnya, data yang telah berhasil diakses, di *export* kedalam bentuk .tif lalu diagregasikan secara spasial ke tingkat kabupaten/kota menggunakan batas wilayah administrasi yang bersumber dari BIG. Setiap daerah kemudian dihitung nilai rata-rata konsentrasi NO_2 untuk setiap tahunnya.

Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Geographically Weighted Panel Regression* (GWPR). Metode GWPR merupakan gabungan dari metode GWR dan regresi data panel. Kombinasi ini akan berpengaruh terhadap ukuran sampel sehingga terjadi peningkatan pada derajat kebebasan. Bertambahnya derajat kebebasan akan meningkatkan variabilitas dan hasil estimasi menjadi lebih optimal (Yu, 2010). Metode GWPR juga dirancang untuk menangani adanya indikasi heterogenitas spasial antardaerah (Yu, 2010). Heterogenitas spasial menunjukkan adanya perbedaan karakteristik antar amatan yang tidak dapat ditangkap oleh regresi data panel atau regresi global biasa (Fotheringham et al., 2002). Sebelum melakukan estimasi model, tahapan penting yang perlu dilakukan dalam analisis GWPR yakni menentukan fungsi pembobot spasial sesuai dengan karakteristik data yang dimiliki melalui pemilihan *kernel* dan *bandwidth*. Pemilihan fungsi kernel dan bandwidth perlu dilakukan dengan hati-hati karena akan memengaruhi bias dari hasil estimasi parameter (Fotheringham et al., 2002). Dalam model spasial, jenis *kernel* yang biasa digunakan terdiri dari *bisquare*, *gaussian*, dan *exponential*. Sedangkan jenis bandwidth yang biasa digunakan yaitu *fixed* dan *adaptive*. Setelah dilakukan pemilihan fungsi pembobot, tahapan analisis dilanjutkan dengan pengujian hipotesis penelitian dan pembentukan model estimasi GWPR. Adapun hipotesis alternatif yang digunakan dalam penelitian ini yaitu terdapat pengaruh spasial-temporal variabel rata-rata lama sekolah, PDRB per kapita, pengeluaran per kapita, dan persentase *green jobs* terhadap tingkat polusi NO_2 .

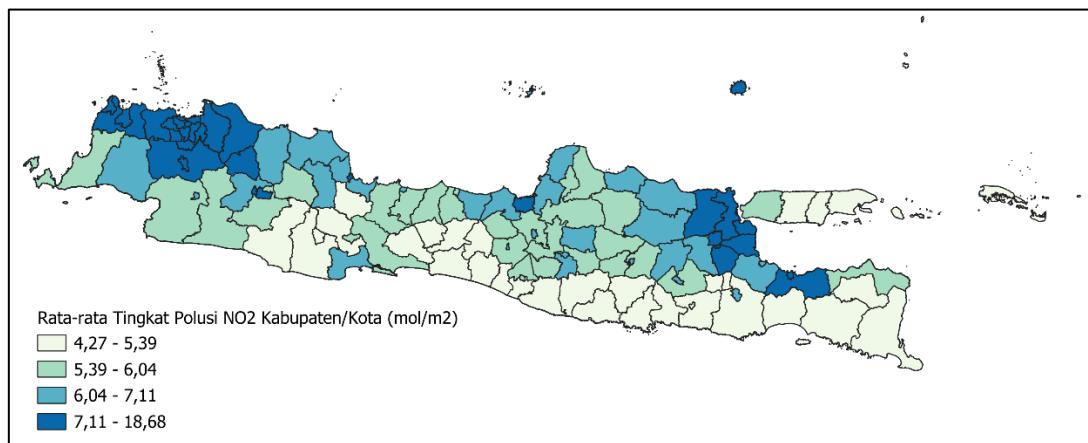
Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa perangkat lunak seperti Microsoft Excel dan SPSS version 22 untuk mengolah seluruh data dasar, Quantum Geographic Information System (QGIS) Desktop version 3.36.0 untuk mengolah peta spasial, platform *Google Earth Engine* untuk mengakses data konsentrasi nitrogen dioksida, serta R Studio version 2024.12.1 untuk melakukan pengujian hipotesis penelitian dan melakukan estimasi model.

TEMUAN DAN PEMBAHASAN

Sebaran Spasial Tingkat Polusi NO_2 di Regional Jawa

Sebaran rata-rata konsentrasi tingkat polusi gas nitrogen dioksida (NO_2) di regional Jawa selama periode 2018-2023 bervariasi secara spasial seperti yang terlihat pada **Gambar 1**. Tingkat konsentrasi tertinggi gas NO_2 terdapat di sekitar kawasan metropolitan Jabodetabek, Kota Bandung, Kota

Semarang, dan kawasan metropolitan Gerbangkertosusila. Tingginya konsentrasi gas NO₂ di wilayah-wilayah tersebut menunjukkan polusi udara yang semakin tercemar. Daerah-daerah tersebut umumnya merupakan daerah yang didominasi oleh sektor industri dan jasa dengan ciri tingkat urbanisasi yang tinggi. Kondisi ini merupakan gambaran langsung bahwa industrialisasi berperan besar dalam meningkatkan konsentrasi gas NO₂ sehingga menyebabkan polusi udara yang tinggi. Pada Gambar 1. Juga terlihat kecenderungan pola spasial dimana semakin jauh suatu daerah dari daerah yang memiliki tingkat industrialisasi yang tinggi, maka kecenderungan tingkat polusi NO₂ semakin rendah. Hal ini terlihat di bagian selatan regional Jawa yang relatif memiliki tingkat polusi NO₂ yang lebih rendah jika dibandingkan daerah utara.



Gambar 1. Rata-rata Konsentrasi Tingkat Polusi NO₂ Kabupaten/Kota di Regional Jawa, 2018-2023
(Sumber: Hasil Analisis Peneliti, 2025)

Gambaran Umum Variabel Penelitian

Tabel 1. menunjukkan statistik deskriptif dari masing-masing variabel. Dapat dilihat bahwa selama periode 2018-2023, tingkat konsentrasi gas NO₂ terendah mencapai 4,06 mol/m². Kondisi ini tercatat di Kabupaten Banyuwangi. Sementara itu, kondisi polusi tertinggi tercatat di Kota Jakarta Selatan yang mencapai 24,82 mol/m². Pada variabel rata-rata lama sekolah, capaian terendah tercatat di Kabupaten Sampang dengan lama sekolah sekitar 4,36 tahun, sedangkan capaian tertinggi terjadi di Kota Yogyakarta dengan lama sekolah sekitar 12,11 tahun. Pada variabel PDRB per kapita, nilai terendah tercatat di Kabupaten Pemalang dengan nilai PDRB per kapita sekitar 12,37 juta rupiah per tahun, sedangkan nilai tertinggi tercatat di Kota Jakarta Pusat dengan nilai PDRB per kapita sekitar 497,78 juta rupiah per tahun. Untuk variabel persentase *green jobs*, persentase terendah pernah tercatat di Kabupaten Sampang yakni sebesar 0,29 persen, dan tertinggi tercatat di Kabupaten Tangerang sebesar 7,77 persen. Sementara itu, pengeluaran per kapita terendah terjadi di Kabupaten Garut dengan pengeluaran per kapita sebesar 7,6 juta rupiah per tahun, dan tertinggi terjadi di Kota Jakarta Selatan yakni sebesar 24,98 juta per tahun.

Tabel 1. Statistik Deskriptif Variabel

Variabel	Satuan	Rata-rata	Min	Maks	Standar Deviasi
Tingkat Polusi NO ₂	Mol/m ²	7,09	4,06	24,82	3,17
Rata-rata Lama Sekolah	Tahun	8,40	4,36	12,11	1,62
PDRB per Kapita	Juta rupiah	43,40	12,37	497,78	57,19
Persentase <i>Green Jobs</i>	Persen	2,51	0,29	7,77	0,98
Pengeluaran per Kapita	Juta rupiah	11,89	7,60	24,98	2,85

Sumber: Hasil Analisis Peneliti, 2025

Pemilihan Fungsi Pembobot

Pemilihan fungsi pembobot dilakukan dengan membandingkan performa dari masing-masing variasi fungsi pembobot kernel dan bandwith. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa fungsi kernel *exponential* dengan bandwith *adaptive* memberikan performa terbaik dengan nilai R² sebesar 0,883, *adjusted*

R^2 sebesar 0,864, dan nilai bandwith sebesar 20. Fungsi pembobot *adaptive exponential* dipilih karena nilai R^2 yang tidak terlalu besar dibanding fungsi pembobot lainnya. Fotheringham et al. (2002) menyatakan bahwa nilai R^2 yang sangat tinggi ($> 0,9$) cenderung tidak baik karena dapat menyebabkan model menjadi *overfitting* atau hasil estimasi menjadi kurang representatif. Selain itu, fungsi pembobot *adaptive exponential* memiliki nilai AIC dan AICc yang relatif lebih kecil dibanding fungsi pembobot lainnya (Tabel 2).

Tabel 2. Statistik Deskriptif Variabel

Jenis Bandwith	Jenis Kernel	RSS	R ²	R ² Adj	AIC	AICc
Adaptive	Bisquare	703,337	0,902	0,878	2128,277	2286,638
Adaptive	Gaussian	865,506	0,879	0,862	2232,602	2319,004
Adaptive	Exponential	834,967	0,883	0,865	2208,186	2296,398
Fixed	Bisquare	729,356	0,898	0,873	2160,592	2330,855
Fixed	Gaussian	620,933	0,913	0,878	2097,373	2379,997
Fixed	Exponential	624,490	0,913	0,879	2084,692	2327,554

Sumber: Hasil Analisis Peneliti, 2025

Estimasi Model GWPR

Hasil analisis GWPR yang ditampilkan pada Tabel 3. dapat menjadi dasar dalam menyusun strategi intervensi penanganan polusi udara NO₂ pada level kabupaten/kota di regional Jawa. Nilai R^2 sebesar 0,883 menunjukkan bahwa model GWPR yang terbentuk mampu menjelaskan sekitar 88,3 persen dari variasi tingkat polusi NO₂ sebesar Variabel-variabel independen yang signifikan, bervariasi antardaerah. Hal ini menunjukkan adanya heterogenitas spasial karena perbedaan karakteristik lokal tiap daerah. Sebanyak 7 daerah memperlihatkan pengaruh yang signifikan antara tingkat polusi NO₂ dengan seluruh variabel independen yang meliputi, RLS, PDRB per kapita, persentase *green jobs*, dan pengeluaran per kapita. Kondisi ini menunjukkan bahwa masalah polusi NO₂ merupakan hal yang dinamis dan kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai faktor.

Namun demikian, masih terdapat 13 daerah lainnya yang ditemukan tidak signifikan pada setiap variabel independen. Hal ini menunjukkan bahwa variabel-variabel independen tidak mampu menjelaskan fenomena perkembangan polusi NO₂ di wilayah tersebut. Terdapat faktor lain di luar model yang memengaruhi perkembangan polusi NO₂ selama periode 2018-2023.

Tabel 3. Hasil Analisis GWPR dengan Pembobot *Adaptive Exponential*

Variabel yang Signifikan	Kabupaten/Kota
RLS, PDRB per kapita, Green Jobs, Pengeluaran per kapita	Kabupaten Indramayu, Kabupaten Blitar, Kabupaten Malang, Kabupaten Lumajang, Kabupaten Probolinggo, Kota Malang, Kota Pasuruan
RLS, PDRB per kapita, Pengeluaran per kapita	Kabupaten Kepulauan Seribu, Kabupaten Subang, Kabupaten Purwakarta, Kabupaten Pacitan, Kabupaten Ponorogo, Kabupaten Trenggalek, Kabupaten Tulungagung, Kabupaten Madiun, Kabupaten Bojonegoro, Kabupaten Tuban, Kota Blitar
RLS, Green Jobs, Pengeluaran per kapita	Kota Jakarta Pusat, Kota Jakarta Barat, Kabupaten Cianjur, Kota Bekasi, Kabupaten Pasuruan, Kota Probolinggo, Kota Batu, Kota Tangerang, Kota Tangerang Selatan
PDRB per kapita, Green Jobs, Pengeluaran per kapita	Kabupaten Bandung, Kabupaten Tasikmalaya, Kabupaten Majalengka, Kota Depok
RLS, Pengeluaran per kapita	Kabupaten Karawang, Kabupaten Bekasi, Kabupaten Kediri, Kota Kediri, Kabupaten Pandeglang, Kabupaten Tangerang, Kabupaten Serang, Kota Cilegon, Kota Serang
PDRB per kapita, Green Jobs,	Kabupaten Ciamis, Kabupaten Kuningan, Kabupaten Cirebon, Kabupaten Pangandaran, Kota Cirebon
PDRB per kapita, Pengeluaran per kapita	Kabupaten Garut, Kabupaten Sumedang, Kabupaten Bandung Barat, Kota Tasikmalaya, Kabupaten Wonogiri, Kabupaten Blora, Kabupaten Rembang, Kabupaten Sidoarjo, Kabupaten Magetan, Kabupaten Ngawi, Kabupaten Lamongan, Kabupaten Gresik, Kabupaten Bangkalan, Kabupaten Sampang, Kabupaten Pamekasan, Kabupaten Sumenep, Kota

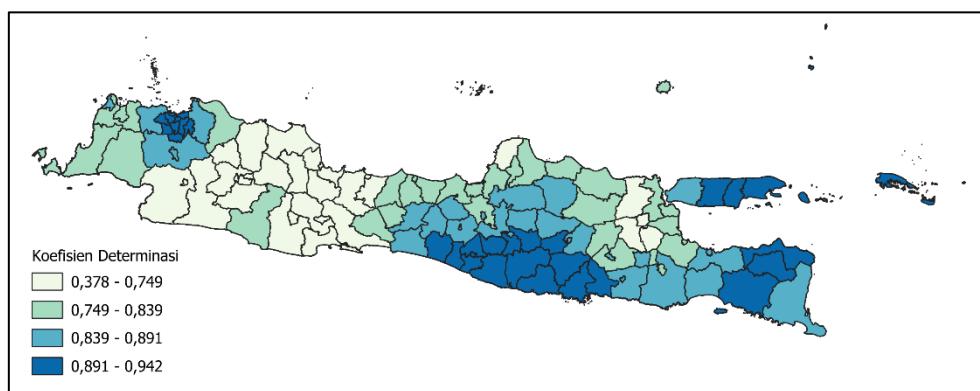
Variabel yang Signifikan	Kabupaten/Kota
	Madiun, Kota Surabaya
Green Jobs, Pengeluaran per kapita	Kota Jakarta Selatan, Kota Jakarta Timur, Kota Jakarta Utara, Kabupaten Bogor, Kota Bogor, Kota Sukabumi, Kabupaten Mojokerto
RLS	Kabupaten Banyuwangi
PDRB per kapita	Kabupaten Banjarnegara, Kabupaten Kebumen, Kabupaten Purworejo, Kabupaten Wonosobo, Kabupaten Magelang, Kabupaten Boyolali, Kabupaten Klaten, Kabupaten Sukoharjo, Kabupaten Karanganyar, Kabupaten Sragen, Kabupaten Semarang, Kabupaten Temanggung, Kabupaten Kendal, Kabupaten Batang, Kabupaten Brebes, Kota Magelang, Kota Surakarta, Kota Salatiga, Kota Semarang, Kota Pekalongan, Kota Tegal, Kabupaten Kulon Progo, Kabupaten Bantul, Kabupaten Gunungkidul, Kota Yogyakarta, Kabupaten Situbondo
Green Jobs	Kota Bandung, Kota Banjar, Kabupaten Cilacap
Pengeluaran per kapita	Kabupaten Sukabumi, Kabupaten Jember, Kabupaten Jombang, Kabupaten Nganjuk, Kota Mojokerto, Kabupaten Lebak
Tidak ada yang signifikan	Kota Cimahi, Kabupaten Banyumas, Kabupaten Purbalingga, Kabupaten Grobogan, Kabupaten Pati, Kabupaten Kudus, Kabupaten Jepara, Kabupaten Demak, Kabupaten Pekalongan, Kabupaten Pemalang, Kabupaten Tegal, Kabupaten Sleman, Kabupaten Bondowoso

Sumber: Hasil Analisis Peneliti, 2025

Koefisien Determinasi Kabupaten/Kota

Nilai koefisien determinasi (R^2) lokal tiap daerah cukup bervariasi, menunjukkan perbedaan kemampuan model dalam menjelaskan dinamika polusi NO_2 di tiap-tiap daerah (Gambar 2.). Sebagai contoh, nilai koefisien determinasi tertinggi terdapat di Kabupaten Pacitan yakni sebesar 0,942, menunjukkan bahwa model GWPR yang terbentuk mampu menjelaskan sekitar 94,2 persen variasi perkembangan polusi NO_2 di daerah Kabupaten Pacitan. Sementara itu, Kota Cirebon memiliki nilai koefisien determinasi terendah yaitu sebesar 0,378, yang berarti model GWPR yang terbentuk hanya mampu menjelaskan sekitar 37,8 persen variasi perkembangan polusi NO_2 di daerah Kota Cirebon. Sisanya dijelaskan oleh faktor lain yang ada diluar model.

Kawasan Jabodetabek dengan konsentrasi polusi NO_2 yang relatif tinggi, rata-rata memiliki nilai koefisien determinasi yang tinggi pula. Hal ini menunjukkan bahwa tingginya polusi NO_2 di kawasan Jabodetabek sebagian besar dapat dijelaskan oleh variabel-variabel independen yang ada dalam model. Berbeda halnya dengan daerah-daerah di sekitar Kota Surabaya, nilai koefisien determinasinya tidak setinggi daerah-daerah di kawasan Jabodetabek, tetapi masih tergolong cukup tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat polusi NO_2 di sekitar Kota Surabaya lebih bersifat dinamis dan dipengaruhi oleh berbagai faktor dibanding tingkat polusi di sekitar kawasan Jabodetabek.

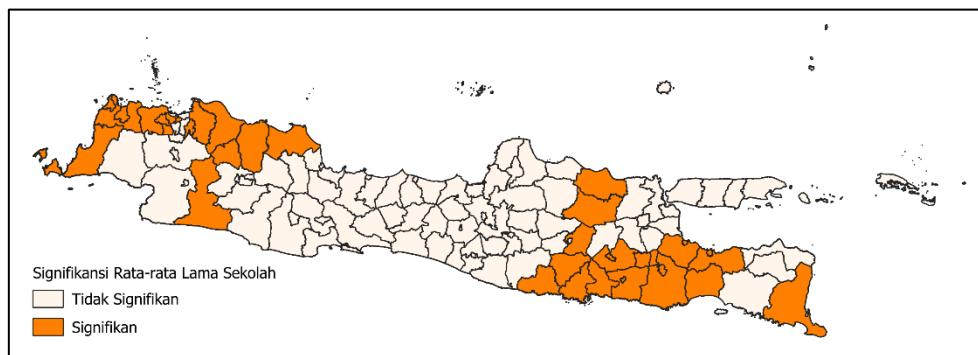


Gambar 2. Sebaran Spasial Koefisien Determinasi Kabupaten/Kota
(Sumber: Hasil Analisis Peneliti, 2025)

Pengaruh Rata-rata Lama Sekolah terhadap Tingkat Polusi NO_2

Hasil estimasi model GWPR menunjukkan pengaruh spasial-temporal rata-rata lama sekolah terhadap tingkat polusi NO_2 bervariasi secara spasial (Gambar 3). Sebagian daerah yang signifikan

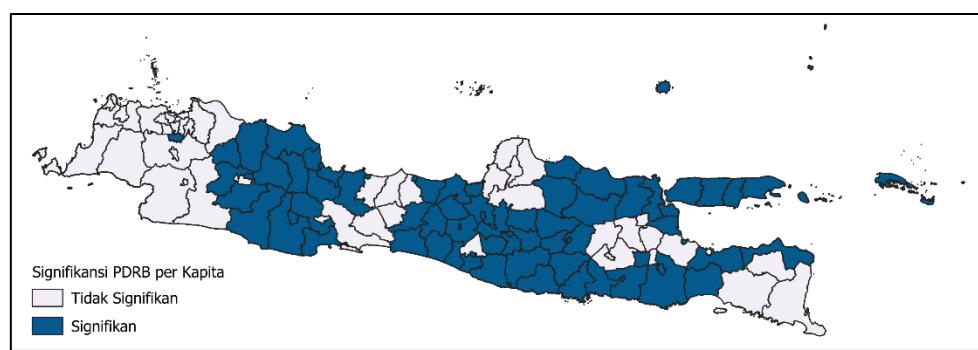
membentuk klaster di bagian barat dan timur regional Jawa. Daerah-daerah yang signifikan umumnya memiliki rata-rata lama sekolah yang tinggi, seperti Kota Jakarta Barat, Tangerang Selatan, dan Malang. Namun beberapa daerah lainnya seperti Kabupaten Pandeglang, Indramayu, dan Probolinggo juga menunjukkan pengaruh yang kuat terhadap polusi NO_2 , meskipun rata-rata lama sekolah di daerah-daerah tersebut cenderung rendah. Fenomena ini sejalan dengan temuan Hoy et al. (2025) dimana hubungan antara pendidikan dan polusi udara NO_2 cenderung membentuk pola *U-shaped*. Tingkat pendidikan yang tinggi cenderung berasosiasi dengan lingkungan yang bersifat urban dengan karakteristik industri dan jasa yang mencolok. Hal ini yang kemudian dapat memicu peningkatan polusi udara di daerah-daerah tersebut. Meskipun demikian, pendidikan yang tinggi juga cenderung berpengaruh terhadap perilaku peduli lingkungan (Alam & Zakaria, 2021). Kesadaran yang tinggi terhadap isu lingkungan berpotensi memengaruhi sikap terhadap polusi serta memitigasinya.



Gambar 3. Sebaran Kabupaten/Kota menurut Status Signifikansi Variabel Rata-rata Lama Sekolah
(Sumber: Hasil Analisis Peneliti, 2025)

Pengaruh PDRB per Kapita terhadap Tingkat Polusi NO_2

Pengaruh PDRB per kapita terhadap tingkat polusi NO_2 membentuk klaster yang signifikan di sekitar Jawa Barat bagian timur, Jawa Tengah, dan Jawa Timur (Gambar 4.). Sebagian besar daerah menunjukkan hubungan positif dan signifikan, yang menekankan bahwa polusi udara merupakan cerminan dari pertumbuhan ekonomi di suatu daerah (Li et al., 2021). Peningkatan ekonomi yang terjadi di beberapa daerah di regional Jawa memberikan konsekuensi terhadap kerusakan lingkungan apabila terus berlanjut dalam jangka panjang (Mohamud & Hassan, 2021). Kondisi ini membutuhkan regulasi pembangunan ekonomi yang juga berfokus pada pelestarian lingkungan agar capaian pembangunan ekonomi dapat bersifat berkelanjutan. Sementara itu, di beberapa daerah seperti di sekitar Jabodetabek menunjukkan pengaruh yang lemah antara PDRB per kapita terhadap polusi NO_2 . Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan mengikuti pola kurva EKC, dimana setelah melewati titik pertumbuhan ekonomi tertentu, dampak negatif polusi mulai berkurang (Kuznets, 1955).

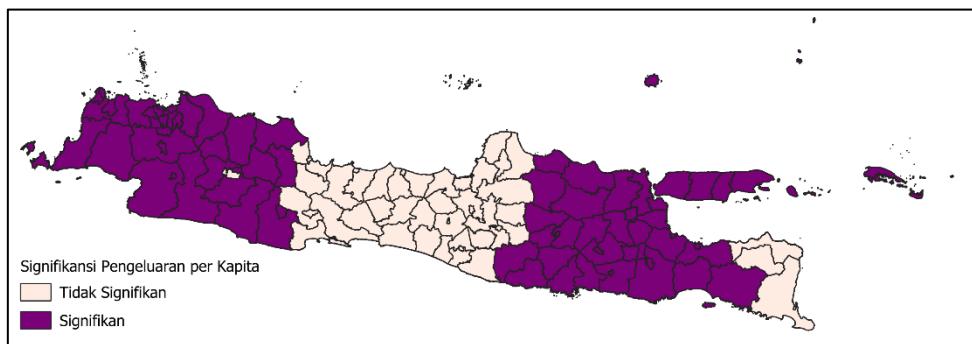


Gambar 4. Sebaran Kabupaten/Kota menurut Status Signifikansi Variabel PDRB per Kapita
(Sumber: Hasil Analisis Peneliti, 2025)

Pengaruh Pengeluaran per Kapita terhadap Tingkat Polusi NO_2

Pengaruh pengeluaran per kapita terhadap tingkat polusi NO_2 terlihat jelas membentuk klaster-klaster besar seperti pada Gambar 5. Kabupaten/kota di daerah Banten, Jakarta dan sebagian besar

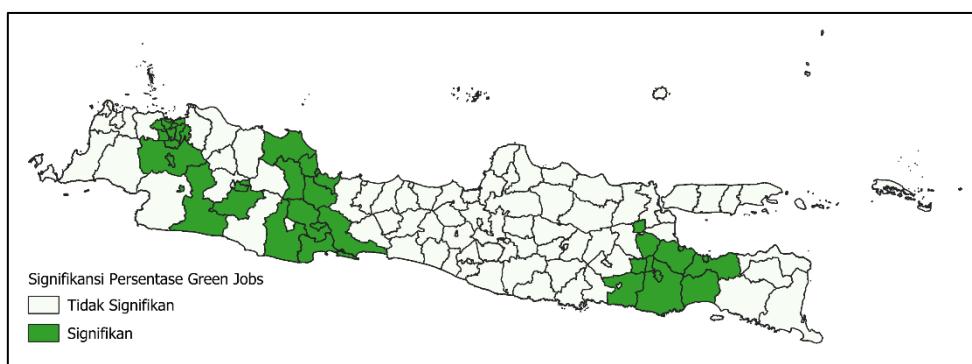
Jawa Barat menunjukkan pengaruh yang signifikan. Begitupula dengan kabupaten/kota di sebagian besar Jawa Timur. Temuan ini mengindikasikan bahwa tingkat daya beli dan konsumsi belanja masyarakat pada wilayah-wilayah tersebut berkontribusi langsung terhadap ekspansi aktivitas ekonomi lokal. Tingkat konsumsi per kapita yang lebih tinggi cenderung memicu peningkatan konsumsi energi dan penggunaan sumber daya sehingga meningkatkan polusi serta emisi (Amalina et al., 2023). Di sisi lain, tingkat konsumsi per kapita oleh rumah tangga dianggap berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonomi (Andayani & Setiawati, 2025). Dalam hal ini, konsekuensi dari peningkatan polusi udara yang disebabkan oleh peningkatan ekonomi yang dikemukakan oleh Kuznets (1955) dan Li et al. (2021) dapat juga disebabkan oleh peningkatan konsumsi tiap rumah tangga.



Gambar 5. Sebaran Kabupaten/Kota menurut Status Signifikansi Variabel Pengeluaran per Kapita
(Sumber: Analisis Penulis, 2025)

Pengaruh Persentase *Green Jobs* terhadap Tingkat Polusi NO₂

Pengaruh persentase *green jobs* terhadap tingkat polusi NO₂ juga membentuk tiga klaster yang signifikan seperti yang terlihat pada **Gambar 6**. Daerah-daerah di sekitar Jabodetabek dan Bandung umumnya memiliki tingkat perekonomian yang jauh didominasi oleh sektor jasa. Hal ini menunjukkan bahwa implementasi *green jobs* di sektor jasa sangat erat kaitannya dengan perkembangan polusi NO₂. *Green jobs* dapat berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon dan polusi lingkungan (Shibata et al., 2022). Oleh karena itu, peningkatan *green jobs* kini menjadi salah satu target pembangunan bagi pemerintah demi mendukung implementasi pembangunan ekonomi hijau di Indonesia (BAPPENAS, 2022). Kebijakan ini juga diharapkan dapat mendorong capaian SDGs pada pilar lingkungan. Namun demikian, beberapa daerah lainnya menunjukkan hasil yang tidak signifikan. Dalam hal ini, perlu dilakukan *reskilling* atau penyesuaian keterampilan untuk tenaga kerja yang dapat dilakukan melalui peningkatan pendidikan serta pemberian pelatihan kerja.



Gambar 6. Sebaran Kabupaten/Kota menurut Status Signifikansi Variabel Persentase *Green Jobs*
(Sumber: Hasil Analisis Peneliti, 2025)

SIMPULAN

Secara umum hasil analisis GWPR menunjukkan adanya heterogenitas spasial antardaerah dalam menjelaskan perkembangan tingkat polusi NO₂ di regional Jawa. Kondisi tingkat polusi NO₂ tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik sosial ekonomi tiap daerah, tetapi juga oleh keterkaitan spasial antardaerah. Temuan ini menegaskan bahwa penanganan polusi NO₂ di setiap daerah memerlukan kebijakan yang bersifat terintegrasi antara aspek sosial, ekonomi, maupun lingkungan. Kebijakan pengendalian polusi tidak hanya cukup dengan mengatur regulasi terkait pengurangan emisi maupun peningkatan kualitas lingkungan, tetapi juga perlu disertai dengan penguatan di sektor lain seperti peningkatan kapasitas SDM di bidang pendidikan, penerapan pertumbuhan ekonomi yang berbasis keberlanjutan, serta peningkatan implementasi ekonomi hijau.

DAFTAR PUSTAKA

Alam, M. M., & Zakaria, A. F. M. (2021). A Probit Estimation of Urban Bases of Environmental Awareness: Evidence from Sylhet City, Bangladesh. *arXiv preprint arXiv:2107.08342*.

Amalina, I. S. N., Wahyudi, H., & Ciptawaty, U. (2023). Pengaruh GDP Per Kapita, dan Konsumsi Energi Terhadap Emisi CO₂ di Indonesia. *Journal on Education*, 6(1), 6508-6517.

Andayani, S. V., & Setiawati, R. I. (2025). Analysis of the Effect of Household Consumption, Domestic Investment, Regional Expenditure, and Labor on Economic Growth in Five Regencies/Cities in West Java. *Journal of Regional Economics and Development*, 3(1), 15.

Badan Perencanaan Pembangunan Nasional. (2022). *Green Economy Index: A Step Forward to Measure the Progress of Low Carbon and Green Economy in Indonesia*. Jakarta: Bappenas.

Badan Pusat Statistik. (2018–2023). *[Metode Baru] Pengeluaran per Kapita Disesuaikan menurut Kabupaten/Kota di Indonesia*. Diakses 8 Juni 2025, dari <https://www.bps.go.id/>

Badan Pusat Statistik. (2018–2023). *[Metode Baru] Rata-rata Lama Sekolah menurut Kabupaten/Kota di Indonesia*. Diakses 8 Juni 2025, dari <https://www.bps.go.id/>

Fotheringham, A. S., Brunsdon, C., & Charlton, M. (2002). *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships*. Wiley

Guo, X., Zhang, Z., Cai, Z., Wang, L., Gu, Z., Xu, Y., & Zhao, J. (2022). Analysis of the spatial–temporal distribution characteristics of NO₂ and their influencing factors in the Yangtze River Delta Based on Sentinel-5P Satellite Data. *Atmosphere*, 13(11), 1923.

Han, C., Gu, Z., & Yang, H. (2021). EKC test of the relationship between nitrogen dioxide pollution and economic growth—A spatial econometric analysis based on Chinese city data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 9697.

Hoy, A., Mohan, G., & Nolan, A. (2025). Investigating inequalities in NO₂ air pollution concentrations on novel indicators relating to small spatial areas. *International Journal for Equity in Health*, 24(1), 324.

ILO. (2016). *Sustainable development, decent work and green jobs*. Geneva, Switzerland: International Labour Office. dari https://www.ilo.org/global/publications/WCMS_207370

Kuznets, S. (1955). Economic Growth and Income Inequality. *American Economic Review*, 45(1), 1–28.

Li, Z., Chen, W., Chang, I., & Hung, C. (2021). Dynamic Relationship between Air Pollution and Economic Growth in Taiwan Deduced from Mathematical Models. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 49(10), 2100081.

Majid, F. A., Mustikaningrum, I. A., & Ammar, L. A. (2025). Affecting Factors NO₂ Distribution between 2019-2021 in the East Java, Indonesia. *International Journal of Environment and Climate Change*, 15(2), 102-111.

Mohamud, M. H., & Hassan, A. Y. (2024). Modelling the Relationship between Air Pollution and Economic Growth in Somalia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 14(5), 558–565.

Mustansar, T., Timmermans, E. J., Silva, A. I., Bijnens, E. M., Lefebvre, W., Saenen, N. D., ... & Vaartjes, I. (2025). Socioeconomic inequalities and ambient air pollution exposure in school-aged children living in an affluent society: an analysis on individual and aggregated data in Belgium. *Health & Place*, 93, 103473.

Parmitasari, A. P., & Widayani, P. (2022). Pemantauan Konsentrasi Gas Polutan NO₂ Menggunakan Sentinel-5P dan Hubungannya terhadap Penyakit Infeksi Saluran Pernapasan Akut di Pulau Jawa Tahun 2022 (Skripsi). Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Rahman, M. M., Wang, S., Zhao, W., Arshad, A., Zhang, W., & He, C. (2023). Comprehensive evaluation of spatial distribution and Temporal trend of NO₂, SO₂ and AOD using satellite observations over South and East Asia from 2011 to 2021. *Remote Sensing*, 15(20), 5069.

Shibata I, Mano R., & Bergant K. (2022). From Polluting to Green Jobs: A Seamless Transition in the U.S? *IMF Working Papers*, (129):1-1.

Wei, J., Li, Z., Wang, J., Li, C., Gupta, P., & Cribb, M. (2023). Ground-level gaseous pollutants (NO₂, SO₂, and CO) in China: daily seamless mapping and spatiotemporal variations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(2), 1511-1532.

Yu, D. (2010). Exploring spatiotemporally varying regressed relationships: The geographically weighted panel regression approach. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 58(4), 555–576.

Zheng, S., & Kahn, M. E. (2017). A new era of pollution progress in urban China? *Journal of Economic Perspectives*, 31(1), 71–92.

Zouine, M., El Adnani, M. J., Salhi, S. E., & El Anouar, E. M. (2024). Does higher education lead to lower environmental pollution? New evidence from MENA countries using econometric panel data. *Transnational Corporations Review*, 16(4), 200077.