



Analisis Faktor Penentu Indeks Kualitas Udara Pada Sepuluh Provinsi Dengan Jumlah Industri Besar Dan Menengah Terbanyak Di Indonesia

Iman Jaya Gea¹, Zulfa Emalia²

Fakultas Ekonomi Dan Bisnis, Universitas Lampung, Indonesia¹⁻²

Email Korespondensi: imanjayagea090602@gmail.com¹, zulfa.emalia@feb.unila.ac.id²

Article received: 01 Januari 2026, Review process: 12 Januari 2026

Article Accepted: 22 Februari 2026, Article published: 01 Maret 2026

ABSTRACT

Air quality decline is an increasingly serious environmental problem in Indonesia, especially in areas with a high number of large and medium industries (LMICs). Intensive industrial activity, the growth in the number of motorized vehicles, and an increasing population have the potential to put significant pressure on air quality. This study aims to analyze the influence of the Gross Regional Domestic Product (GRDP) of the manufacturing industry, the number of vehicles, and the number of residents on the Air Quality Index (IKU) in the ten provinces with the largest number of LMICs in Indonesia. The research method used is a quantitative approach with a panel Autoregressive Distributed Lag (ARDL) model using Pooled Mean Group (PMG) estimation, which allows for simultaneous analysis of short-term and long-term relationships. The results show that in the long term, the GRDP of the manufacturing industry and the number of residents have a negative and significant effect on the KPI, while the number of vehicles has a positive and significant effect. Meanwhile, in the short term, the GRDP of the manufacturing industry and the number of vehicles have a significant effect on the KPI, while the number of residents does not show a significant effect. These findings confirm the long-term relationship between economic activity, mobility, and demographic dynamics on air quality, so that development policies oriented towards environmental sustainability are needed.

Keywords: Air Quality Index, Manufacturing Industry, ARDL Panel

ABSTRAK

Penurunan kualitas udara merupakan permasalahan lingkungan yang semakin serius di Indonesia, terutama di wilayah dengan jumlah industri besar dan menengah (IBM) yang tinggi. Aktivitas industri yang intensif, pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor, serta peningkatan jumlah penduduk berpotensi memberikan tekanan signifikan terhadap kualitas lingkungan udara. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh nilai Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) industri manufaktur, jumlah kendaraan, dan jumlah penduduk terhadap Indeks Kualitas Udara (IKU) di sepuluh provinsi dengan jumlah IBM terbanyak di Indonesia. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif dengan model panel Autoregressive Distributed Lag (ARDL) menggunakan estimasi Pooled Mean Group (PMG), yang memungkinkan analisis hubungan jangka pendek dan jangka panjang secara simultan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dalam jangka panjang, nilai PDRB industri manufaktur dan jumlah penduduk berpengaruh negatif dan signifikan terhadap IKU, sedangkan jumlah kendaraan berpengaruh positif dan signifikan. Sementara itu, dalam jangka pendek, nilai PDRB industri manufaktur dan jumlah kendaraan berpengaruh signifikan terhadap IKU, sedangkan jumlah penduduk tidak menunjukkan

pengaruh yang signifikan. Temuan ini menegaskan adanya hubungan jangka panjang antara aktivitas ekonomi, mobilitas, dan dinamika demografis terhadap kualitas udara, sehingga diperlukan kebijakan pembangunan yang berorientasi pada keberlanjutan lingkungan.

Kata kunci: Indeks Kualitas Udara, Industri Manufaktur, Panel ARDL

PENDAHULUAN

Pertumbuhan ekonomi didefinisikan sebagai peningkatan kapasitas produksi suatu negara yang tercermin dalam kenaikan output barang dan jasa dari waktu ke waktu. Dalam satu dekade terakhir, perekonomian global menunjukkan tren pertumbuhan yang relatif konsisten, didorong oleh ekspansi industri, peningkatan perdagangan internasional, serta percepatan inovasi teknologi. Industrialisasi menjadi motor utama pertumbuhan karena mampu menciptakan nilai tambah dan mendorong transformasi struktural dari sektor primer ke sektor sekunder dan tersier, yang pada akhirnya meningkatkan kesejahteraan masyarakat (Oentoro et al., 2024). Namun, berbagai pengalaman negara menunjukkan bahwa industrialisasi juga membawa konsekuensi lingkungan yang signifikan. Peningkatan permintaan energi, perluasan kawasan industri, dan intensifikasi transportasi berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara, terutama di negara berkembang yang pertumbuhan ekonominya tidak diimbangi dengan pengelolaan lingkungan yang memadai (Abid et al., 2023; Voumik & Sultana, 2022).

Ekspansi industri global telah memperparah tantangan lingkungan melalui peningkatan emisi gas pencemar seperti PM_{2.5}, CO₂, NO_x, dan SO₂ yang bersumber dari aktivitas produksi, konsumsi energi fosil, dan urbanisasi cepat (Lei et al., 2021). Polusi udara kini menjadi salah satu isu lingkungan paling krusial, dengan konsentrasi PM_{2.5} di banyak wilayah dunia melampaui ambang aman WHO sebesar 5 µg/m³ per tahun. Di Indonesia, data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) menunjukkan bahwa sejumlah kawasan perkotaan dan industri mencatat konsentrasi PM_{2.5} tahunan mencapai 20–30 µg/m³, bahkan lebih tinggi pada periode tertentu. Kondisi ini diperburuk oleh meningkatnya emisi CO₂ dari sektor energi dan industri serta emisi NO_x dan SO₂ dari pembakaran bahan bakar fosil, yang secara kumulatif menekan kualitas udara nasional.

Sebagai negara berkembang, Indonesia menjadikan industrialisasi sebagai pilar utama pembangunan nasional karena perannya dalam meningkatkan nilai tambah, menyerap tenaga kerja, dan memperkuat daya saing ekonomi. Pertumbuhan ekonomi Indonesia relatif stabil dalam beberapa tahun terakhir, didukung oleh peran dominan sektor manufaktur sebagai kontributor utama PDB (R et al., 2025). Meski demikian, pembangunan industri di Indonesia bersifat tidak merata secara geografis dan terkonsentrasi di beberapa provinsi tertentu, terutama di Pulau Jawa (Fasta et al., 2025). Konsentrasi industri ini menghasilkan manfaat ekonomi yang signifikan, tetapi juga menciptakan trade-off dengan kualitas lingkungan. Data Bank Dunia (2023) menunjukkan bahwa emisi CO₂ Indonesia meningkat dari 421 juta ton pada 2010 menjadi 619 juta ton pada 2022, sejalan dengan pertumbuhan PDB. Pada periode yang sama, konsumsi bahan bakar fosil meningkat secara tajam (KESDM, 2023), disertai lonjakan jumlah kendaraan bermotor dari 94 juta unit pada 2015 menjadi lebih dari 150 juta unit pada 2023 (BPS). Fakta ini

menegaskan dilema pembangunan antara pertumbuhan ekonomi dan keberlanjutan lingkungan.

Untuk merespons tekanan lingkungan tersebut, pemerintah Indonesia menggunakan Indeks Kualitas Lingkungan Hidup (IKLH) sebagai instrumen evaluasi resmi. IKLH terdiri atas tiga komponen utama, yaitu Indeks Kualitas Udara (IKU), Indeks Kualitas Air (IKA), dan Indeks Kualitas Tutupan Lahan (IKTL). Di antara ketiganya, IKU memperoleh bobot tertinggi sebesar 40% karena dampaknya yang langsung terhadap kesehatan masyarakat dan kondisi lingkungan secara keseluruhan (KLHK, 2022). IKU mengukur kualitas udara berdasarkan konsentrasi polutan utama seperti PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO_x, CO, dan O₃, serta menjadi indikator penting untuk menilai tekanan pembangunan terhadap lingkungan. Dalam kerangka regulasi KLHK, nilai IKU diklasifikasikan ke dalam kategori baik, sedang, dan buruk, sehingga memudahkan evaluasi kinerja lingkungan di tingkat provinsi.

Berdasarkan Laporan IKLH 2024, kualitas udara Indonesia secara nasional masih berada pada kategori “sedang”. Namun, nilai agregat nasional ini berpotensi menutupi variasi kualitas udara antarprovinsi. Beberapa wilayah dengan konsentrasi industri dan kendaraan yang tinggi menunjukkan tekanan polusi udara yang jauh lebih besar dibandingkan wilayah lain. Laporan KLHK (2023) menegaskan bahwa variasi IKU tertinggi terjadi di provinsi dengan populasi industri dan kendaraan terbesar. Data pemantauan juga menunjukkan bahwa rata-rata konsentrasi PM_{2.5} nasional pada 2023 mencapai 37,1 µg/m³, jauh di atas standar WHO, dengan kota-kota besar seperti Jakarta, Bekasi, dan Bandung sering berada pada kategori tidak sehat. Hal ini mengindikasikan bahwa permasalahan kualitas udara di Indonesia bersifat struktural dan berulang seiring meningkatnya aktivitas ekonomi dan urbanisasi.

Secara teoretis, hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan kualitas lingkungan dijelaskan melalui Environmental Kuznets Curve (EKC), yang menunjukkan pola hubungan berbentuk U terbalik antara pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan (Grossman & Krueger, 1991). Pada tahap awal pertumbuhan, industrialisasi dan urbanisasi meningkatkan emisi dan menurunkan kualitas udara. Namun, setelah mencapai tingkat pendapatan tertentu, peningkatan kesadaran lingkungan dan adopsi teknologi bersih dapat memperbaiki kualitas udara. Temuan empiris di negara-negara ASEAN dan G20, termasuk Indonesia, mendukung validitas EKC, di mana transformasi industri menuju ekonomi hijau berpotensi meningkatkan kualitas udara meskipun pertumbuhan ekonomi berlanjut (Shahbaz et al., 2023; Alola et al., 2024).

Dalam konteks Indonesia, penurunan kualitas udara dipengaruhi oleh tiga faktor utama, yaitu aktivitas industri, sektor transportasi, dan pertumbuhan penduduk. Sektor industri berkontribusi signifikan terhadap emisi PM_{2.5}, NO_x, dan SO₂, terutama di provinsi dengan konsentrasi Industri Besar dan Menengah (IBM) yang tinggi (Lazarov et al., 2013; Kim et al., 2015). Di sisi lain, sektor transportasi menjadi penyumbang utama polusi udara di wilayah perkotaan, dengan kontribusi hingga 60% emisi PM_{2.5} dan NO_x di Jakarta (Etchie & Etchie, 2020; Better Air, Better Indonesia, 2025). Selain itu, pertumbuhan penduduk dan urbanisasi meningkatkan tekanan lingkungan melalui peningkatan konsumsi energi, mobilitas, dan

permintaan industri, yang secara empiris terbukti menurunkan nilai IKU (Phungrassami & Usubharatana, 2021; Maryani, 2022).

Meskipun sejumlah penelitian telah mengkaji hubungan antara industrialisasi, urbanisasi, dan kualitas udara di Indonesia, sebagian besar masih bersifat parsial, statis, dan berfokus pada skala nasional. Keterbatasan ini membuka ruang bagi penelitian yang mengintegrasikan dimensi spasial dan temporal di tingkat provinsi untuk menganalisis determinan kualitas udara secara lebih komprehensif. Dengan demikian, studi yang berfokus pada provinsi dengan konsentrasi IBM tertinggi menjadi penting untuk memahami dinamika trade-off antara pertumbuhan ekonomi dan kualitas lingkungan, sekaligus memberikan dasar empiris yang lebih kuat bagi perumusan kebijakan pembangunan berkelanjutan di Indonesia.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode deskriptif-analitis untuk menganalisis pengaruh jumlah kendaraan, nilai PDRB sektor industri manufaktur, dan jumlah penduduk terhadap kualitas udara di Indonesia. Data yang digunakan merupakan data sekunder berbentuk panel tahunan periode 2015–2024 pada sepuluh provinsi dengan **jumlah Industri Besar dan Menengah (IBM) tertinggi**, yaitu DKI Jakarta, Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur, Banten, Sumatera Utara, Riau, Lampung, Kalimantan Timur, dan Sulawesi Tenggara. Pemilihan periode ini didasarkan pada dinamika penting pembangunan nasional, mulai dari fase ekspansi industri intensif, periode pandemi COVID-19, hingga transisi menuju kebijakan pembangunan berorientasi lingkungan dan ekonomi hijau. Data diperoleh dari lembaga resmi seperti Badan Pusat Statistik (BPS), Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Kementerian Perindustrian, Bank Dunia, dan IQAir, sehingga menjamin validitas dan reliabilitas sumber data. Variabel dependen dalam penelitian ini adalah Indeks Kualitas Udara (IKU), yang merepresentasikan kondisi pencemaran udara berdasarkan konsentrasi polutan utama, seperti $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO_2 , dan O_3 . Variabel independen meliputi nilai PDRB sektor industri manufaktur sebagai proksi aktivitas ekonomi industri, jumlah kendaraan sebagai indikator intensitas transportasi, serta jumlah penduduk yang merepresentasikan tekanan demografis dan tingkat urbanisasi. Seluruh variabel diukur secara kuantitatif pada tingkat provinsi dan dianalisis secara konsisten untuk menangkap hubungan struktural antara aktivitas ekonomi, tekanan sosial, dan kualitas lingkungan (Maimunah et al., 2021). Penggunaan data panel memungkinkan analisis variasi antarwilayah dan antarwaktu secara simultan.

Metode analisis yang digunakan adalah panel Autoregressive Distributed Lag (ARDL), karena mampu mengestimasi hubungan jangka pendek dan jangka panjang secara bersamaan serta tidak mensyaratkan tingkat integrasi variabel yang sama, selama tidak terdapat variabel yang terintegrasi pada orde $I(2)$. Tahapan analisis meliputi uji stasioneritas menggunakan ADF-Fisher, uji kointegrasi panel dengan metode Pedroni untuk mengidentifikasi hubungan jangka panjang, serta penentuan lag optimum berdasarkan kriteria Akaike Information Criterion (AIC) dan Schwarz Bayesian Criterion (SBC). Pengujian hipotesis dilakukan melalui uji

parsial (uji t) dan evaluasi signifikansi koefisien jangka panjang serta *error correction term* (ECT) dalam kerangka ARDL. Pendekatan ini dinilai paling sesuai untuk menjelaskan dinamika temporal dan struktural pengaruh industrialisasi, transportasi, dan urbanisasi terhadap Indeks Kualitas Udara di Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1 Hasil Estimasi Model ARDL Jangka Panjang dan Jangka Pendek

Variabel	Koefisien Jangka Panjang	Prob.	Koefisien Jangka Pendek	Prob.	Keterangan
IND	-0.079980	0.0003	0.712641	0.0674	Negatif signifikan (JP), positif signifikan 10% (JK)
KEND	0.267236	0.0000	-1.222295	0.0668	Positif signifikan (JP), negatif signifikan 10% (JK)
POP	-0.152337	0.0000	-2.460057	0.1678	Negatif signifikan (JP), tidak signifikan (JK)
C	4.502631	0.0000	-	-	Konstanta
COINTEQ	-	-	-0.970752	0.0000	Penyesuaian jangka panjang

Sumber: Hasil Olah Data EViews 13, data diolah

Hasil estimasi model ARDL menunjukkan bahwa dalam jangka panjang, variabel aktivitas industri manufaktur (IND) dan jumlah penduduk (POP) berpengaruh negatif dan signifikan terhadap Indeks Kualitas Udara (IKU), sedangkan jumlah kendaraan (KEND) berpengaruh positif dan signifikan. Koefisien IND sebesar -0.079980 mengindikasikan bahwa peningkatan aktivitas industri dalam jangka panjang cenderung menurunkan kualitas udara akibat meningkatnya emisi dan pencemaran dari proses produksi. Demikian pula, pertumbuhan jumlah penduduk yang ditunjukkan oleh koefisien POP sebesar -0.152337 mencerminkan tekanan demografis terhadap lingkungan yang tidak diimbangi oleh kapasitas infrastruktur dan daya dukung lingkungan. Sebaliknya, pengaruh positif KEND dalam jangka panjang menunjukkan adanya pergeseran struktural di sektor transportasi, seperti penerapan kebijakan lingkungan dan adopsi teknologi kendaraan ramah lingkungan. Pada jangka pendek, variabel IND dan KEND menunjukkan pengaruh signifikan pada tingkat 10 persen dengan arah yang berlawanan dibandingkan jangka panjang, sementara POP tidak berpengaruh signifikan, yang menandakan bahwa dinamika jangka pendek belum cukup kuat memengaruhi kualitas udara secara konsisten. Nilai *error correction term*

(COINTEQ) yang negatif dan signifikan sebesar -0.970752 menunjukkan adanya mekanisme penyesuaian menuju keseimbangan jangka panjang yang stabil dan relatif cepat. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa faktor industri dan demografi merupakan determinan utama penurunan kualitas udara dalam jangka panjang, sementara sektor transportasi menunjukkan potensi perbaikan kualitas udara melalui inovasi dan kebijakan berkelanjutan.

Tabel 2 Hasil Uji Pengaruh Parsial (Uji-t) Model ARDL

Variabel	t- Statistik Jangka Panjang	Prob.	Keputusan	t- Statistik Jangka Pendek	Prob.	Keputusan
IND	- 3.778557	0.0003	H ₀ ditolak	1.853184	0.0674	H ₀ ditolak (α 10%)
KEND	9.568211	0.0000	H ₀ ditolak	- 1.857322	0.0668	H ₀ ditolak (α 10%)
POP	- 6.631251	0.0000	H ₀ ditolak	- 1.391287	0.1678	H ₀ diterima
t-tabel	1.645	-	-	1.645	-	-

Sumber: Hasil Olah Data EViews 13, data diolah

Berdasarkan hasil uji pengaruh parsial (uji-t), diperoleh bahwa dalam jangka panjang seluruh variabel independen, yaitu nilai PDRB industri manufaktur (IND), jumlah kendaraan (KEND), dan jumlah penduduk (POP), berpengaruh signifikan terhadap Indeks Kualitas Udara (IKU) pada tingkat signifikansi 5 persen. Variabel IND memiliki nilai t-statistik absolut sebesar 3.778557 yang lebih besar dari t-tabel 1.645 dengan probabilitas 0.0003, sehingga menunjukkan pengaruh negatif dan signifikan terhadap IKU. Variabel KEND menunjukkan pengaruh positif dan signifikan dengan nilai t-statistik sebesar 9.568211 dan probabilitas 0.0000, sedangkan variabel POP berpengaruh negatif dan signifikan dengan nilai t-statistik absolut sebesar 6.631251 dan probabilitas 0.0000. Pada jangka pendek, variabel IND dan KEND memiliki pengaruh signifikan pada tingkat signifikansi 10 persen, namun dengan arah yang berbeda dibandingkan jangka panjang, sementara variabel POP tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap IKU. Hasil ini mengindikasikan bahwa pengaruh industri dan transportasi terhadap kualitas udara lebih bersifat struktural dan konsisten dalam jangka panjang, sedangkan perubahan jumlah penduduk tidak memberikan dampak langsung yang signifikan dalam jangka pendek terhadap kualitas udara.

Tabel 3 Hasil Uji Pengaruh Serempak (Uji-F) Model ARDL

Variabel	Koefisien	Probabilitas	Keputusan
COINTEQ (ECT)	-0.970752	0.0000	H ₀ ditolak

Sumber: Hasil Olah Data EViews 13, data diolah

Berdasarkan hasil estimasi model panel ARDL dengan pendekatan Pooled Mean Group (PMG), diperoleh nilai error correction term (ECT) sebesar -0.970752 dengan tingkat probabilitas 0.0000, yang berarti signifikan pada tingkat signifikansi 5 persen. Nilai koefisien ECT yang negatif dan signifikan menunjukkan bahwa hipotesis nol (H_0) ditolak dan hipotesis alternatif (H_a) diterima, sehingga dapat disimpulkan bahwa variabel nilai PDRB industri manufaktur, jumlah kendaraan, dan jumlah penduduk secara serempak memiliki hubungan jangka panjang terhadap Indeks Kualitas Udara (IKU). Selain itu, besarnya koefisien ECT mengindikasikan bahwa mekanisme penyesuaian menuju keseimbangan jangka panjang berlangsung relatif cepat, di mana setiap penyimpangan dari keseimbangan pada periode sebelumnya akan dikoreksi pada periode berjalan. Hal ini menegaskan bahwa model ARDL yang digunakan bersifat stabil dan layak untuk menjelaskan dinamika hubungan antara aktivitas ekonomi, tekanan transportasi, dan faktor demografis terhadap kualitas udara di Indonesia.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai PDRB industri manufaktur memiliki pengaruh negatif dan signifikan terhadap Indeks Kualitas Udara (IKU) dalam jangka panjang. Temuan ini sejalan dengan hipotesis penelitian dan mengindikasikan bahwa peningkatan aktivitas industri manufaktur secara berkelanjutan berkontribusi pada penurunan kualitas udara. Dalam jangka panjang, pertumbuhan industri mendorong peningkatan konsumsi energi, intensitas proses produksi, serta aktivitas transportasi dan logistik, yang pada akhirnya meningkatkan emisi polutan udara seperti partikulat, gas rumah kaca, dan senyawa berbahaya lainnya (Emalia et.al, 2020). Kondisi ini mencerminkan adanya trade-off antara pertumbuhan ekonomi dan kualitas lingkungan, di mana orientasi industri yang masih menitikberatkan pada peningkatan output dan efisiensi produksi sering kali mengesampingkan aspek lingkungan (Ye, 2025). Akumulasi polusi dari aktivitas industri tidak hanya berdampak secara lokal, tetapi juga menyebar lintas wilayah, sehingga secara bertahap menurunkan kualitas udara dan tercermin dalam penurunan IKU (Li & Chen, 2025).

Temuan tersebut konsisten dengan teori Environmental Kuznets Curve (EKC), yang menjelaskan bahwa pada tahap awal pembangunan ekonomi, pertumbuhan industri dan pendapatan cenderung diikuti oleh penurunan kualitas lingkungan akibat meningkatnya eksploitasi sumber daya dan polusi. Penelitian ini sejalan dengan hasil Mazwan & Tain (2024) yang menemukan bahwa ekspansi sektor industri pada tahap awal pembangunan ekonomi di Indonesia berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara akibat penggunaan energi dan teknologi produksi yang belum ramah lingkungan. Dukungan empiris juga diberikan oleh Putra & Karimi (2024), yang menunjukkan bahwa wilayah dengan aktivitas industri manufaktur tinggi cenderung mengalami penurunan kualitas udara. Bukti ini menegaskan bahwa pertumbuhan ekonomi berbasis industri, meskipun meningkatkan output regional, tetap memberikan tekanan signifikan terhadap lingkungan jika tidak diimbangi dengan teknologi bersih dan kebijakan pengendalian emisi yang efektif (Suparta et. al, 2025).

Sebaliknya, dalam jangka pendek, nilai PDRB industri manufaktur justru menunjukkan pengaruh positif dan signifikan terhadap IKU, meskipun arah

hubungan ini tidak sejalan dengan hipotesis awal. Hasil ini mengindikasikan bahwa peningkatan aktivitas industri dalam periode waktu yang relatif singkat belum secara langsung menurunkan kualitas udara. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh adanya penyesuaian awal dalam proses produksi, penerapan teknologi yang relatif lebih efisien, serta kepatuhan industri terhadap regulasi lingkungan pada fase awal operasional. Menurut teori EKC, hubungan antara aktivitas ekonomi dan kualitas lingkungan bersifat dinamis dan dipengaruhi oleh waktu. Dalam jangka pendek, modernisasi industri, peningkatan efisiensi energi, serta adopsi teknologi produksi yang lebih bersih dapat sementara waktu mengurangi tekanan pencemaran udara sebelum efek intensifikasi produksi muncul dalam jangka panjang (Mark et al., 2025). Temuan ini juga konsisten dengan penelitian Amponsah et al. (2025) dan Feng et al. (2023) yang menunjukkan bahwa inovasi teknologi dan efisiensi produksi dapat menekan emisi polutan dalam jangka pendek.

Analisis deskriptif antarprovinsi memperkuat hasil tersebut. Provinsi Jawa Barat, sebagai salah satu pusat industri manufaktur terbesar di Indonesia, menunjukkan nilai PDRB industri yang tinggi dengan IKU yang relatif rendah. Kondisi ini menggambarkan fase EKC di mana ekspansi industri yang masif meningkatkan konsumsi energi dan emisi polutan, sehingga menurunkan kualitas udara secara bertahap. Temuan ini mempertegas bahwa tanpa regulasi dan pengelolaan lingkungan yang efektif, pertumbuhan industri dalam jangka panjang akan berdampak negatif terhadap kualitas udara (Wahyudi et al, 2023).

Untuk variabel jumlah kendaraan, hasil estimasi menunjukkan pola yang berbeda antara jangka pendek dan jangka panjang. Dalam jangka panjang, jumlah kendaraan berpengaruh positif dan signifikan terhadap IKU, yang pada awalnya tampak bertentangan dengan pandangan umum bahwa kendaraan merupakan sumber utama polusi udara. Namun, hubungan positif ini dapat dijelaskan melalui perkembangan teknologi kendaraan dan kebijakan lingkungan. Peningkatan jumlah kendaraan dalam jangka panjang sering kali disertai dengan penerapan standar emisi yang lebih ketat, peremajaan armada, serta peningkatan penggunaan kendaraan listrik dan hybrid (Ravi et al., 2023). Selain itu, pengembangan infrastruktur transportasi dan sistem transportasi terpadu dapat mengurangi kemacetan dan waktu tempuh, sehingga menekan emisi kendaraan (Gutman & Malashenko, 2025). Dalam kerangka EKC, kondisi ini mencerminkan tahap lanjut pembangunan ekonomi, di mana kemajuan teknologi dan regulasi mampu mengurangi dampak negatif aktivitas ekonomi terhadap lingkungan (Prasetyanto & Sari, 2021).

Namun demikian, dalam jangka pendek, jumlah kendaraan berpengaruh negatif dan signifikan terhadap IKU, sesuai dengan hipotesis penelitian. Peningkatan jumlah kendaraan dalam periode singkat secara langsung meningkatkan emisi CO, NO₂, dan partikulat, terutama karena dominasi kendaraan dengan teknologi konvensional. Temuan ini sejalan dengan Indriyani et al. (2022) yang menemukan bahwa peningkatan jumlah kendaraan berkorelasi dengan peningkatan konsentrasi PM dan TSP dalam jangka pendek. Analisis antarprovinsi menunjukkan bahwa Jakarta, dengan jumlah kendaraan yang sangat tinggi, memiliki nilai IKU yang relatif rendah, mencerminkan tekanan besar terhadap

kualitas udara akibat kemacetan dan intensitas aktivitas transportasi. Sebaliknya, Sulawesi Tenggara menunjukkan jumlah kendaraan rendah dengan IKU tinggi, yang mengindikasikan kualitas udara yang lebih baik akibat rendahnya tekanan transportasi dan aktivitas industri.

Sementara itu, jumlah penduduk menunjukkan pengaruh negatif dan signifikan terhadap IKU dalam jangka panjang, yang konsisten dengan hipotesis penelitian. Pertumbuhan penduduk meningkatkan aktivitas manusia seperti transportasi, konsumsi energi, dan penggunaan lahan, yang berkontribusi pada peningkatan emisi polutan udara (Manisalidis et al., 2020). Infrastruktur lingkungan yang tidak memadai di wilayah padat penduduk, seperti keterbatasan transportasi umum dan pengelolaan energi berbasis fosil, memperburuk kondisi kualitas udara (T & Kavitha, 2024). Temuan ini sejalan dengan penelitian Huang & Wu (2023), Wrightson (2025), serta Borck & Schrauth (2020) yang menunjukkan bahwa wilayah dengan konsentrasi penduduk tinggi cenderung mengalami tingkat polusi udara yang lebih tinggi.

Dalam jangka pendek, jumlah penduduk memiliki pengaruh negatif tetapi tidak signifikan terhadap IKU, yang menunjukkan bahwa dampak pertumbuhan penduduk terhadap kualitas udara bersifat laten dan membutuhkan waktu untuk terakumulasi. Pertumbuhan populasi tidak serta-merta meningkatkan emisi dalam waktu singkat karena efeknya dimediasi oleh aktivitas turunan seperti peningkatan kendaraan, industri, dan konsumsi energi (Pham et al., 2020; Schwarz et al., 2016). Selain itu, kebijakan pengendalian emisi, faktor meteorologi, dan fluktuasi aktivitas ekonomi dapat menutupi pengaruh langsung populasi terhadap kualitas udara dalam jangka pendek (Yousefian et al., 2020; Luo et al., 2025). Temuan ini konsisten dengan Neill et al. (2012), Martínez-Zarzoso & Maruotti (2011), serta Sarker et al. (2024) yang menyatakan bahwa efek langsung populasi terhadap kualitas lingkungan sering kali lemah dalam analisis jangka pendek.

SIMPULAN

Berdasarkan rumusan masalah, hipotesis, serta hasil analisis dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa nilai PDRB industri manufaktur dalam jangka panjang berpengaruh negatif dan signifikan terhadap Indeks Kualitas Udara (IKU), sementara dalam jangka pendek berpengaruh positif dan signifikan pada 10 provinsi dengan jumlah industri besar dan menengah (IBM) terbanyak di Indonesia. Jumlah kendaraan menunjukkan pengaruh positif dan signifikan terhadap IKU dalam jangka panjang, namun berpengaruh negatif dan signifikan dalam jangka pendek. Selanjutnya, jumlah penduduk dalam jangka panjang berpengaruh negatif dan signifikan terhadap IKU, sedangkan dalam jangka pendek berpengaruh negatif tetapi tidak signifikan terhadap IKU pada wilayah penelitian tersebut.

DAFTAR RUJUKAN

Alola, A., Sunday, T., Temitope, T., & Bob, O. (2024). Moderating roles of technological innovation and economic complexity in the financial development–environmental quality nexus of the BRICS economies.

-
- Technology in Society*, 78, 102581.
<https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102581>
- Amponsah, S., Kwesi, S., & Junior, H. (2025). Research and development, economic growth, CO₂ emissions, and the environmental Kuznets curve. *Sustainable Futures*, 9, 100541. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100541>
- Artikel, S. (2022). Pemetaan perkembangan Program Kampung Keluarga Berencana (KB) dengan sistem informasi geografis di Kabupaten Sukabumi. *Jurnal*, 1, 1–7.
- Baek, J. I., & Ban, Y. U. (2020). The impacts of urban air pollution emission density on air pollutant concentration based on a panel model. *Atmospheric Pollution Research*.
- Borck, R., & Schrauth, P. (2020). Regional science and urban economics. *Regional Science and Urban Economics*, 103596.
<https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2020.103596>
- Chandra, I. (2021). Quantitative analysis of the automobile sector in the Indonesian automotive roadmap for achieving national oil and CO₂ emission reduction targets by 2030. *Energy Policy*, 150(2), 112135.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112135>
- Etchie, T. O., & Etchie, A. T. (2020). Particulate air pollution in Indonesia: Quality index, characteristics, and source identification. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 599(1), 012084. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/599/1/012084>
- Emalia, Z., Moniyana, R., & Murniati. (2020). *Economic determinants of carbon dioxide emissions: A proof of the environmental Kuznets curve hypothesis in Asia*. International Journal of Scientific & Technology Research, 9(1), 6877–6885.
- Feng, T., Chen, X., Ma, J., Sun, Y., Du, H., Yao, Y., Chen, Z., Wang, S., & Mi, Z. (2023). Air pollution control or economic development? Empirical evidence from enterprises with production restrictions. *Journal of Environmental Management*, 336, 117611. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117611>
- Feriansyah, F., & Larre, A. A. (2022). Economic growth and CO₂ emissions in ASEAN: A panel ARDL approach. *Economics and Finance in Indonesia*, 68(2).
- Gina, N., Yackob, S., & Fitria, A. (2020). Correlation model of horizontal geometric and road grade on CO₂ and PM_{2.5} vehicle emissions in Bandung City. *IOP Conference Series*, 198, 239–245.
- Hariwan, P., Sunaryo, F. K., & Kholil, M. (2022). Determining factors of energy intensity in the manufacturing industry of provinces in Indonesia. *Journal of Earth Energy Engineering*. <https://doi.org/10.25299/jeee.2022.10649>
- Haslina, S., Shafie, M., & Mahmud, M. (2020). Urban air pollutants from motor vehicle emissions in Kuala Lumpur, Malaysia. *Environmental Monitoring*, 2793–2804.
- Huang, F., & Wu, Q. (2023). Population mobility and urban air quality: Causal inference and impact measurement. *Environmental Studies*, 1–19.
- Iqbal, K., Hassan, S. T., & Geng, Y. (2024). Impact of green technological innovations, ICT, and renewable energy on CO₂ emissions in emerging economies. *Environmental Research*. <https://doi.org/10.1155/er/5594324>
-

- Khan, H., & Khan, I. (2023). The effect of technological innovations, urbanization, and economic growth on environmental quality: Does governance matter? *Frontiers in Environmental Science*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1239288>
- Landrigan, P. J. (2024). The health and economic benefits of climate mitigation and pollution control. *The Lancet Planetary Health*, 2(3), e107–e108. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(18\)30008-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30008-1)
- Lazarov, B., Swinnen, R., Spruyt, M., Goelen, E., Stranger, M., Desmet, G., & Wauters, E. (2013). Optimisation steps of an innovative air sampling method for semi-volatile organic compounds. *Atmospheric Environment*, 79, 780–786. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.059>
- Lei, R., Feng, S., & Lauvaux, T. (2021). Country-scale trends in air pollution and fossil fuel CO₂ emissions during 2001–2018. *Environmental Research Letters*, 16(1), 014006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc9e1>
- Maimunah, E., Sirat, M., & Pratiwi, D. M. (2021). Efisiensi alokasi faktor produksi usaha peternak sapi potong (studi kasus Desa Asto Mulyo, Kecamatan Punggur, Kabupaten Lampung Tengah). *Jurnal Ilmiah Peternakan Terpadu*, 9(1), 72–84. <https://doi.org/10.23960/jipt.v9i1.p72-84>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., & Stavropoulos, A. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health*, 8, 14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Martínez-Zarzoso, I., & Maruotti, A. (2011). The impact of urbanization on CO₂ emissions: Evidence from developing countries. *Ecological Economics*, 70(7), 1344–1353. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.02.009>
- Suparta, I. W., Wiryawan, D., Ciptawaty, U., & Wahyudi, H. (2025). *Impact of Covid-19 and foreign direct investment on Indonesia's economic growth*. *International Journal of Economics and Financial Issues*, 15(2), 1–8. <https://doi.org/10.32479/ijefi.17679>
- Sarkodie, S. A., & Strezov, V. (2019). A review on environmental Kuznets curve hypothesis using bibliometric and meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 649, 128–145. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.276>
- Voumik, L. C., & Sultana, T. (2022). Impact of urbanization, industrialization, electrification, and renewable energy on the environment in BRICS: Evidence from CS-ARDL. *Heliyon*, 8(11), e11457. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11457>
- Wahyudi, Heru/Ciptawaty, Ukhti et. al. (2023). Comparison of renewable and non renewable energy in the long and short term of Indonesia economy. In: *International Journal of Energy Economics and Policy* 13 (5), S. 194 - 201. <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/download/14611/7467/34211>. doi:10.32479/ijeep.14611
- Xuan, V. N. (2024). Determinants of environmental pollution: Evidence from Indonesia. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(4), 100386. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100386>

Zhan, C., Xie, M., Lu, H., Liu, B., Wu, Z., Wang, T., & Zhuang, B. (2023). Impacts of urbanization on air quality and related health risks in complex terrain cities. *Environmental Pollution*, 388, 771–788.