# ANALISIS DINAMIS FAKTOR DETERMINAN POLUSI UDARA AKIBAT PERTUMBUHAN INDUSTRI DI INDONESIA

**Anggito Abimanyu[1], Amira Layyina Muchtar[2], M. Rifky Mufid[3], Vivia Gladis Ratna Dewati[4], Amanda Syarif[5], Fitri Amalia[6]**

[1,2,3,4,5,6]*UIN Syarif Hidayatullah Jakarta*
E-mail : abimanyu20042006@gmail.com, amiramuchtar@gmail.com, rifkymufid05@gmail.com viviagladis05@gmail.com, amandasyarif0701@gmail.com

**ABSTRAK**

Penelitian ini menganalisis secara dinamis faktor-faktor determinan polusi udara akibat pertumbuhan industri di Indonesia menggunakan data time series tahunan periode 1990–2023 (34 observasi). Variabel yang dianalisis meliputi emisi $CO_2$ per kapita sebagai variabel dependen, serta pertumbuhan industri manufaktur (X1), konsumsi listrik per kapita (X2), dan PDB per kapita (X3) sebagai variabel independen. Karena X1 bersifat stasioner pada level I(0) sedangkan Y, X2, dan X3 stasioner pada first difference I(1), estimasi Vector Error Correction Model (VECM) dilakukan terhadap tiga variabel yang memenuhi syarat kointegrasi, yaitu Y, X2, dan X3, sementara pengaruh X1 dibahas secara deskriptif-komparatif. Uji kointegrasi Johansen mengkonfirmasi satu hubungan keseimbangan jangka panjang antara ketiga variabel tersebut. Hasil estimasi VECM menunjukkan bahwa pendapatan penduduk (X3) merupakan determinan utama polusi udara dalam jangka panjang dengan pengaruh positif dan signifikan (koefisien 47,4119; p = 0,000), konsisten dengan fase awal Environmental Kuznets Curve (EKC). Konsumsi listrik (X2) tidak signifikan dalam jangka panjang namun berperan dalam dinamika penyesuaian jangka pendek. Mekanisme koreksi kesalahan (ECT) signifikan dengan kecepatan penyesuaian 94,69% per tahun, mengindikasikan sistem cepat kembali ke keseimbangan jangka panjang setelah guncangan. Temuan ini menekankan pentingnya kebijakan pembangunan ekonomi yang mempertimbangkan dimensi lingkungan secara simultan, terutama melalui transisi energi dan penerapan teknologi industri rendah emisi.

**Kata Kunci :** *Polusi Udara; Pertumbuhan Industri; Konsumsi Listrik; Pendapatan Penduduk; Environmental Kuznets Curve; VECM*

**ABSTRACT**

This study dynamically analyzes the determinants of air pollution caused by industrial growth in Indonesia using annual time series data from 1990 to 2023 (34 observations). Variables analyzed include $CO_2$ emissions per capita as the dependent variable, and manufacturing industry growth (X1), electricity consumption per capita (X2), and GDP per capita (X3) as independent variables. Since X1 is stationary at level I(0) while Y, X2, and X3 are stationary at first difference I(1), Vector Error Correction Model (VECM) estimation is performed on three cointegrated variables (Y, X2, X3), while the effect of X1 is discussed descriptively. The Johansen cointegration test confirms one long-run equilibrium relationship. VECM results reveal that per capita income (X3) is the main long-run determinant of air pollution with a positive and significant effect (coefficient 47.4119; p = 0.000), consistent with the early phase of the Environmental Kuznets Curve (EKC). Electricity consumption (X2) is not significant in the long run but plays a role in short-run adjustment dynamics. The significant error correction mechanism (ECT) with an adjustment speed of 94.69% per year indicates rapid return to long-run equilibrium after shocks. These findings emphasize the importance of simultaneously integrating environmental dimensions into economic development policies, especially through energy transition and low-emission industrial technologies.

**Keywords :** *Air Pollution; Industrial Growth; Electricity Consumption; Per Capita Income; Environmental Kuznets Curve; VECM*

## PENDAHULUAN

Pembangunan ekonomi di Indonesia menuntut peningkatan output sektor industri manufaktur sebagai motor penggerak utama pertumbuhan makro. Selama tiga dekade terakhir, sektor manufaktur Indonesia mengalami ekspansi yang signifikan, ditandai dengan meningkatnya kontribusi nilai tambah manufaktur terhadap produk domestik bruto (PDB) nasional. Namun di balik pencapaian tersebut, ekspansi pertumbuhan industri manufaktur (X1) membawa konsekuensi eksternalitas negatif berupa peningkatan emisi gas rumah kaca yang memicu polusi udara (Y). Polusi udara yang diindikasikan oleh emisi $CO_2$ per kapita mencerminkan adanya kegagalan pasar (market failure), di mana biaya kerusakan lingkungan akibat aktivitas produksi belum diinternalisasikan oleh pelaku industri (Pigou, 1920).

Peningkatan emisi seiring ekspansi ekonomi ini sejalan dengan fase awal hipotesis Environmental Kuznets Curve (EKC), di mana kerusakan lingkungan cenderung meningkat bersamaan dengan kenaikan skala aktivitas ekonomi pada negara berkembang sebelum mencapai titik balik tertentu (Grossman & Krueger, 1991). Indonesia sebagai salah satu negara dengan populasi terbesar keempat di dunia dan ekonomi terbesar di Asia Tenggara menghadapi tantangan ganda: menjaga momentum pertumbuhan ekonomi sekaligus mengendalikan degradasi kualitas lingkungan. Data World Bank menunjukkan bahwa emisi $CO_2$ per kapita Indonesia terus meningkat dari sekitar 0,7 ton pada tahun 1990 menjadi lebih dari 2 ton pada tahun 2023, seiring dengan pertumbuhan sektor industri dan peningkatan konsumsi energi.

Hubungan antara pertumbuhan industri dan polusi udara melibatkan jalur transmisi yang kompleks, mencakup intensitas energi serta peningkatan kesejahteraan masyarakat. Aktivitas manufaktur secara langsung meningkatkan permintaan turunan (derived demand) terhadap konsumsi energi dan listrik (X2) sebagai input antara dalam rantai produksi (Stern, 2011). Mengingat bauran energi nasional masih didominasi bahan bakar fosil, khususnya batubara yang menyumbang sekitar 60% kapasitas pembangkit listrik nasional (Kementerian ESDM, 2023), lonjakan konsumsi energi berkontribusi langsung pada pelepasan emisi karbon ke atmosfer. Di sisi lain, output aktivitas industri mendorong peningkatan pendapatan penduduk (X3). Berdasarkan kerangka Kaya Identity, perluasan skala ekonomi melalui peningkatan pendapatan per kapita memicu peningkatan konsumsi energi masyarakat secara agregat (scale effect), yang pada akhirnya memperparah degradasi kualitas udara (Sugiawan & Managi, 2016).

Secara empiris, berbagai penelitian telah mencoba mengkaji hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan kualitas lingkungan di Indonesia. Prastiyo dan Hardyastuti (2020) menemukan bahwa hipotesis EKC terkonfirmasi di Indonesia dengan titik balik pendapatan sebesar 2.057,89 USD per kapita, serta terdapat hubungan kausalitas dua arah antara emisi karbon dengan pertumbuhan ekonomi dan sektor manufaktur. Bashir et al. (2019) juga menemukan adanya hubungan kausalitas jangka pendek antara emisi $CO_2$ dan konsumsi energi di Indonesia. Namun, analisis empiris yang menguji keterkaitan dinamis jangka panjang dan jangka pendek secara terintegrasi, khususnya dengan pendekatan VECM yang mengakomodasi hubungan kointegrasi, masih memerlukan pendalaman lebih lanjut.

Penelitian ini merumuskan masalah mengenai apakah pertumbuhan industri manufaktur, konsumsi listrik per kapita, dan pendapatan penduduk (PDB per kapita) berpengaruh terhadap tingkat polusi udara di Indonesia, serta apakah terdapat hubungan keseimbangan jangka panjang antara variabel-variabel tersebut dengan polusi udara. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh masing-masing variabel tersebut terhadap polusi udara di Indonesia

sekaligus membuktikan adanya hubungan jangka panjang dan mekanisme penyesuaian jangka pendek menggunakan pendekatan VECM. Secara teoritis, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan literatur ekonomi lingkungan melalui pengujian Environmental Kuznets Curve (EKC) dalam konteks Indonesia dengan pendekatan dinamis. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan bagi pembuat kebijakan dalam merumuskan strategi pengendalian emisi yang sejalan dengan pertumbuhan ekonomi serta mendukung pembangunan berkelanjutan.

## METODE

### Jenis, Sumber, dan Periode Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan data sekunder berupa data time series tahunan periode 1990–2023 (34 observasi) di Indonesia. Periode pengamatan dipilih untuk mencakup berbagai fase ekonomi Indonesia, mulai dari era pra-krisis, masa reformasi, ekspansi komoditas, hingga era pasca-pandemi. Data diperoleh dari dua sumber utama: World Bank Open Data untuk data emisi $CO_2$ per kapita, pertumbuhan nilai tambah manufaktur, konsumsi listrik per kapita, dan PDB per kapita atas dasar harga konstan; serta Badan Pusat Statistik (BPS) Indonesia sebagai data konfirmasi dan pelengkap.

### Definisi Operasional Variabel

Penelitian ini menggunakan satu variabel dependen dan tiga variabel independen sebagaimana disajikan pada Tabel 1 berikut.

**Tabel 1. Definisi Operasional Variabel**

| Var. | Nama Variabel | Definisi Operasional | Satuan |
|---|---|---|---|
| Y | Tingkat Polusi Udara | Emisi $CO_2$ per kapita sebagai proksi tingkat polusi udara | Ton $CO_2e$/kapita |
| X1 | Pertumbuhan Industri | Pertumbuhan nilai tambah (value added) sektor manufaktur tahunan | Persen (%) |
| X2 | Konsumsi Energi/Listrik | Konsumsi tenaga listrik per kapita sebagai proksi intensitas energi | kWh per kapita |
| X3 | Pendapatan Penduduk | Produk Domestik Bruto (PDB) per kapita atas dasar harga konstan | Rupiah (LCU) |

### Metode Analisis Data: Vector Error Correction Model (VECM)

Penelitian ini menggunakan metode Vector Error Correction Model (VECM) untuk menganalisis hubungan dinamis jangka panjang dan jangka pendek antarvariabel. VECM dipilih karena data time series yang digunakan terindikasi tidak stasioner pada tingkat level namun memiliki hubungan kointegrasi. Konsep kointegrasi dan error correction model pertama kali dikembangkan oleh Engle dan Granger (1987), yang menunjukkan bahwa dua atau lebih variabel

non-stasioner dapat memiliki kombinasi linear yang stasioner, memungkinkan estimasi hubungan keseimbangan jangka panjang dan dinamika jangka pendek secara simultan.

***Uji Stasioneritas (ADF Test)***

Uji stasioneritas dilakukan menggunakan uji Augmented Dickey-Fuller (ADF) untuk menghindari regresi lancung (spurious regression). Pengujian dilakukan pada tingkat level dan first difference. Data dikatakan stasioner apabila nilai probabilitas ADF lebih kecil dari taraf signifikansi 5%, atau nilai statistik ADF lebih kecil (lebih negatif) dari nilai kritisnya.

***Penentuan Lag Optimal***

Panjang lag optimal ditentukan menggunakan kriteria informasi Akaike (AIC), Hannan-Quinn (HQIC), dan Schwarz Bayesian (SBIC). Lag optimal dipilih berdasarkan nilai kriteria yang terkecil dan menjadi dasar penentuan lag dalam pengujian kointegrasi serta estimasi VECM.

***Uji Kointegrasi Johansen***

Uji kointegrasi Johansen dilakukan untuk mengetahui ada tidaknya hubungan keseimbangan jangka panjang antarvariabel I(1). Pengujian menggunakan dua statistik uji: trace statistic dan maximum eigenvalue statistic, yang dibandingkan dengan nilai kritis pada taraf signifikansi 5%. Apabila ditemukan minimal satu hubungan kointegrasi, estimasi VECM dapat dilanjutkan.

***Spesifikasi Model VECM***

Model VECM secara umum dituliskan sebagai:

$$\Delta Yt = \alpha(ECT)t-1 + \Sigma\beta i\Delta Yt-i + \Sigma\gamma i\Delta Xt-i + \varepsilon t$$

di mana ECT (Error Correction Term) merepresentasikan deviasi dari hubungan keseimbangan jangka panjang, α adalah koefisien kecepatan penyesuaian (speed of adjustment), β dan γ merupakan koefisien dinamika jangka pendek, dan εt adalah residual. Estimasi VECM menghasilkan dua bentuk persamaan: persamaan kointegrasi yang menggambarkan hubungan jangka panjang, dan persamaan koreksi kesalahan yang menggambarkan dinamika penyesuaian jangka pendek.

***Uji Diagnostik Model***

Validitas model VECM diverifikasi melalui serangkaian uji diagnostik: (a) uji autokorelasi residual menggunakan Lagrange Multiplier (LM) test; (b) uji normalitas residual menggunakan Jarque-Bera test; dan (c) uji stabilitas model melalui pemeriksaan nilai eigenvalue modulus. Model dinyatakan stabil apabila seluruh nilai modulus eigenvalue berada di dalam unit circle (modulus ≤ 1). Seluruh estimasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Stata 17.

**Catatan Metodologis Mengenai Variabel X1**

Perlu dicatat bahwa variabel pertumbuhan industri (X1) terbukti stasioner pada tingkat level I(0), berbeda dengan Y, X2, dan X3 yang stasioner pada first difference I(1). Salah satu syarat utama estimasi VECM adalah seluruh variabel harus terintegrasi pada ordo yang sama, yaitu I(1). Oleh karena itu, X1 tidak dapat dimasukkan ke dalam estimasi VECM bersama variabel lainnya tanpa melanggar asumsi dasar model. Estimasi VECM dalam penelitian ini hanya melibatkan Y, X2, dan X3, sedangkan pengaruh X1 dibahas secara deskriptif-komparatif berdasarkan data dan kajian literatur. Pendekatan alternatif yang direkomendasikan untuk penelitian lanjutan adalah Autoregressive Distributed Lag (ARDL) yang dapat mengakomodasi variabel dengan ordo integrasi campuran.

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### Statistik Deskriptif

Sebelum memasuki analisis inferensial, statistik deskriptif variabel penelitian disajikan untuk memberikan gambaran umum pola data selama periode 1990–2023. Emisi $CO_2$ per kapita (Y) menunjukkan tren meningkat secara konsisten dari 0,71 ton pada 1990 menjadi 2,14 ton pada 2023, dengan rata-rata 1,38 ton per kapita. Konsumsi listrik per kapita (X2) juga menunjukkan tren naik yang kuat, mencerminkan proses elektrifikasi dan industrialisasi yang pesat. PDB per kapita (X3) mengalami pertumbuhan positif sepanjang periode pengamatan, kecuali pada saat krisis ekonomi 1998 dan pandemi COVID-19 pada 2020. Pertumbuhan industri manufaktur (X1) bersifat fluktuatif, dengan nilai negatif pada periode krisis namun kembali positif pada masa pemulihan.

### Hasil Uji Stasioneritas (ADF Test)

Tabel 2 menyajikan hasil uji ADF pada tingkat level untuk seluruh variabel penelitian.

Tabel 2. Hasil Uji ADF pada Tingkat Level

| Variabel | ADF Statistic | Critical Value 5% | Prob. | Keterangan |
|---|---|---|---|---|
| Y (Polusi Udara) | -2,317 | -2,980 | 0,1666 | Tidak Stasioner |
| X1 (Pertumbuhan Industri) | -2,883 | -2,980 | 0,0474 | Stasioner I(0) |
| X2 (Konsumsi Listrik) | -2,460 | -2,980 | 0,1255 | Tidak Stasioner |
| X3 (Pendapatan Penduduk) | 1,161 | -2,980 | 0,9957 | Tidak Stasioner |

Hasil uji ADF pada Tabel 2 menunjukkan bahwa pada tingkat level, hanya variabel pertumbuhan industri (X1) yang stasioner dengan nilai probabilitas 0,0474 < 0,05. Variabel Y, X2, dan X3 tidak stasioner pada level karena nilai probabilitas masing-masing melebihi taraf signifikansi 5%. Kondisi non-stasioner ini mengindikasikan adanya kemungkinan hubungan kointegrasi yang perlu diuji lebih lanjut.

**Tabel 3. Hasil Uji ADF pada First Difference**

| Variabel | ADF Statistic | Critical Value 5% | Prob. | Keterangan |
|---|---|---|---|---|
| D(Y) | -6,217 | -2,983 | 0,0000 | Stasioner I(1) |
| D(X2) | -5,071 | -2,983 | 0,0000 | Stasioner I(1) |
| D(X3) | -3,388 | -2,983 | 0,0114 | Stasioner I(1) |

Setelah dilakukan diferensiasi pertama, seluruh variabel (D(Y), D(X2), D(X3)) menjadi stasioner pada taraf signifikansi 5%, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai probabilitas yang seluruhnya di bawah 0,05. Dengan demikian, ketiga variabel memenuhi syarat I(1) untuk dilanjutkan ke tahap uji kointegrasi dan estimasi VECM.

**Hasil Penentuan Lag Optimal**

**Tabel 4. Hasil Uji Lag Optimal**

| Kriteria | AIC | HQIC | SBIC |
|---|---|---|---|
| Lag Optimal Terpilih | 1 | 1 | 1 |

Seluruh kriteria informasi (AIC, HQIC, dan SBIC) secara konsisten menunjukkan lag optimal sebesar 1. Konsistensi ketiga kriteria ini memperkuat keyakinan bahwa lag 1 merupakan pilihan yang tepat dan meminimalkan risiko overfitting maupun underfitting. Lag 1 selanjutnya digunakan sebagai dasar penentuan lag dalam pengujian kointegrasi dan estimasi model VECM.

**Hasil Uji Kointegrasi Johansen**

**Tabel 5. Hasil Uji Kointegrasi Johansen (Trace Statistic)**

| Hipotesis (Rank) | Eigenvalue | Trace Statistic | Critical Value 5% | Keterangan |
|---|---|---|---|---|
| r = 0 | - | 397,413 | 29,68 | Tolak $H_0$ |
| r ≤ 1 | 0,5340 | 145,430 | 15,41 | Gagal Tolak $H_0$ |
| r ≤ 2 | 0,3234 | 16,488 | 3,76 | Gagal Tolak $H_0$ |

Hasil uji kointegrasi Johansen pada Tabel 5 menunjukkan bahwa pada hipotesis rank = 0, nilai trace statistic sebesar 39,7413 melebihi nilai kritis 5% sebesar 29,68, sehingga $H_0$ ditolak. Pada rank ≤ 1, nilai trace statistic sebesar 14,5430 lebih kecil dari nilai kritis 15,41, sehingga gagal menolak $H_0$. Hasil ini mengkonfirmasi terdapat tepat satu persamaan kointegrasi (rank = 1), yang berarti terdapat satu hubungan keseimbangan jangka panjang antara Y, X2, dan X3. Dengan demikian, $H_4$ penelitian ini terdukung secara empiris, dan estimasi VECM dapat dilanjutkan.

**Hasil Estimasi VECM**

***Persamaan Jangka Panjang (Kointegrasi)***

**Tabel 6. Persamaan Jangka Panjang (Kointegrasi)**

| Variabel | Koefisien | Std. Error | z-stat | Prob. |
|---|---|---|---|---|
| Konsumsi Listrik (X2) | -43,157 | 280,639 | -0,15 | 0,878 |
| Pendapatan Penduduk (X3) | 47,4119*** | 90,043 | 5,27 | 0,000 |

*Keterangan: *** signifikan pada α = 1%; koefisien dinormalisasi terhadap variabel Y sesuai Johansen normalization restriction; diolah menggunakan Stata 17.*

Persamaan jangka panjang yang dihasilkan adalah:

$$Polusi\ Udara\ (Y) = -4{,}3157\ X2 + 47{,}4119\ X3$$

Variabel pendapatan penduduk (X3) berpengaruh positif dan signifikan terhadap tingkat polusi udara dalam jangka panjang (koefisien 47,4119; p = 0,000). Artinya, setiap kenaikan satu satuan PDB per kapita akan meningkatkan emisi $CO_2$ per kapita sebesar 47,4119 satuan dalam jangka panjang, ceteris paribus. Temuan ini konsisten dengan hipotesis $H_3$ dan fase awal EKC, di mana peningkatan pendapatan masih berasosiasi positif dengan peningkatan polusi karena dominasi scale effect atas technique effect. Sebaliknya, variabel konsumsi listrik (X2) tidak

berpengaruh signifikan terhadap polusi udara dalam jangka panjang (p = 0,878), sehingga $H_2$ tidak terdukung dalam horizon jangka panjang.

***Persamaan Jangka Pendek (Error Correction Term)***

**Tabel 7. Hasil Estimasi Error Correction Term**

| Persamaan | Koefisien ECT | Std. Error | z-stat | Prob. |
|---|---|---|---|---|
| D(Polusi Udara) | -0,9469*** | 0,1767 | -5,36 | 0,000 |
| D(Konsumsi Listrik) | 0,0025** | 0,0010 | 2,43 | 0,015 |
| D(Pendapatan Penduduk) | -0,0003 | 0,0004 | -0,74 | 0,460 |

*Keterangan: *** signifikan pada α = 1%; ** signifikan pada α = 5%.*

Koefisien ECT pada persamaan D(Polusi Udara) sebesar -0,9469 bertanda negatif dan signifikan secara statistik (p = 0,000). Tanda negatif mengkonfirmasi adanya mekanisme koreksi kesalahan yang valid: ketika polusi udara menyimpang dari nilai keseimbangannya, sistem akan melakukan koreksi sebesar 94,69% menuju keseimbangan pada periode berikutnya. Kecepatan penyesuaian yang sangat tinggi ini mengindikasikan bahwa hubungan antara variabel-variabel dalam model bersifat kuat dan responsif. Koefisien ECT pada persamaan D(Konsumsi Listrik) juga signifikan (p = 0,015), mengindikasikan bahwa konsumsi listrik turut menyesuaikan diri terhadap ketidakseimbangan jangka panjang, yang secara tidak langsung menunjukkan peran konsumsi listrik dalam transmisi dinamika jangka pendek.

***Goodness of Fit Model VECM***

**Tabel 8. Goodness of Fit per Persamaan VECM**

| Persamaan | RMSE | R-squared | $chi^2$ (Prob.) |
|---|---|---|---|
| D(Polusi Udara) | $4{,}4 \times 10^8$ | 0,4854 | 29,24 (0,000) |
| D(Konsumsi Listrik) | $2{,}5 \times 10^6$ | 0,1602 | 5,91 (0,052) |
| D(Pendapatan Penduduk) | 915.518 | 0,4893 | 29,70 (0,000) |

Persamaan D(Polusi Udara) dan D(Pendapatan Penduduk) memiliki R-squared yang cukup tinggi (masing-masing 0,4854 dan 0,4893) dan signifikan secara statistik (p = 0,000), menunjukkan bahwa model VECM mampu menjelaskan sekitar 48–49% variasi dalam perubahan kedua variabel tersebut. Persamaan D(Konsumsi Listrik) memiliki R-squared lebih rendah (0,1602) dengan signifikansi pada taraf 10%, mengindikasikan bahwa dinamika jangka pendek konsumsi listrik dipengaruhi faktor-faktor lain di luar model.

**Hasil Uji Diagnostik Model**

**Tabel 9. Ringkasan Hasil Uji Diagnostik VECM**

| Uji Diagnostik | Statistik | Prob. | Kesimpulan |
|---|---|---|---|
| Autokorelasi LM (lag 1) | $chi^2$ = 13,53 | 0,1400 | Tidak ada autokorelasi |
| Autokorelasi LM (lag 2) | $chi^2$ = 12,24 | 0,2002 | Tidak ada autokorelasi |
| Normalitas Jarque-Bera | $chi^2$ = 413,41 | 0,0000 | Residual tidak normal* |
| Stabilitas Eigenvalue Modulus | 0,0766 < 1 | - | Model stabil |

*Pelanggaran normalitas dapat ditoleransi mengingat n = 34 ≥ 30 (Central Limit Theorem berlaku secara asimtotis).*

Hasil uji LM menunjukkan tidak terdapat autokorelasi pada residual model pada lag 1 maupun lag 2 ($p > 0,05$), mengkonfirmasi bahwa model VECM telah terspesifikasi dengan baik tanpa masalah serial korelasi. Hasil uji Jarque-Bera menunjukkan residual tidak berdistribusi normal ($p = 0,000$); namun dengan jumlah observasi $n = 34$ yang telah memenuhi syarat minimum Central Limit Theorem ($n \geq 30$), pelanggaran normalitas ini dapat ditoleransi secara asimtotis dan tidak mengurangi validitas inferensi statistik secara signifikan. Uji stabilitas menunjukkan nilai modulus eigenvalue non-unit sebesar 0,0766 (< 1), mengkonfirmasi bahwa model VECM stabil dan layak digunakan untuk analisis lebih lanjut.

**Pembahasan Hasil dan Implikasi**

***1. Pendapatan Penduduk sebagai Determinan Utama***

Temuan bahwa pendapatan penduduk (X3) merupakan determinan utama polusi udara jangka panjang di Indonesia sejalan dengan prediksi teori EKC pada fase awal pembangunan. Koefisien yang besar (47,4119) mengindikasikan elastisitas polusi terhadap pendapatan yang tinggi, mencerminkan bahwa setiap kenaikan pendapatan masih mendorong peningkatan konsumsi energi dan aktivitas ekonomi yang menghasilkan emisi lebih banyak. Dalam kerangka Kaya Identity, hal ini mencerminkan dominasi scale effect atas technique effect dan composition effect pada tahap pembangunan Indonesia saat ini. Hasil ini mengkonfirmasi bahwa Indonesia masih berada pada sisi kiri kurva EKC, di mana pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan bergerak searah.

Implikasi kebijakan dari temuan ini adalah bahwa strategi pembangunan ekonomi yang hanya mengandalkan pertumbuhan pendapatan tanpa diimbangi kebijakan lingkungan yang kuat akan terus memperburuk kualitas udara. Diperlukan intervensi kebijakan yang mendorong percepatan transisi menuju fase penurunan emisi melalui reformasi subsidi energi, penerapan pajak karbon, dan peningkatan standar efisiensi energi industri.

***2. Peran Konsumsi Listrik dalam Dinamika Jangka Pendek***

Ketidaksignifikan an konsumsi listrik (X2) dalam jangka panjang namun signifikannya dalam penyesuaian jangka pendek memberikan implikasi kebijakan yang menarik. Temuan ini mengindikasikan bahwa bauran energi dalam pembangkitan listrik bersifat dinamis dan dapat dipengaruhi oleh kebijakan dalam jangka pendek, namun belum menjadi faktor struktural dominan dalam menentukan tingkat polusi jangka panjang. Hal ini sejalan dengan temuan Bashir et al. (2019) yang menemukan hubungan kausalitas antara emisi $CO_2$ dan konsumsi energi di Indonesia yang lebih bersifat jangka pendek. Kondisi ini membuka peluang bagi kebijakan transisi energi untuk memberikan dampak jangka pendek yang signifikan melalui perubahan cepat dalam bauran pembangkitan listrik, misalnya melalui percepatan pembangunan energi terbarukan.

***3. Kecepatan Penyesuaian dan Stabilitas Sistem***

Kecepatan penyesuaian ECT sebesar 94,69% per tahun merupakan salah satu temuan paling menarik dalam penelitian ini. Angka ini mengindikasikan bahwa ketidakseimbangan antara tingkat polusi aktual dan nilai keseimbangannya hampir sepenuhnya terkoreksi dalam satu tahun. Kecepatan penyesuaian yang sangat tinggi ini memiliki dua implikasi: pertama, hubungan antara determinan dan polusi udara di Indonesia bersifat kuat dan tidak mudah terganggu dalam jangka panjang; kedua, kebijakan yang berhasil mengubah determinan struktural (terutama pendapatan per kapita dan bauran energi) akan memberikan dampak yang relatif cepat terhadap kualitas udara.

***4. Pertumbuhan Industri: Analisis Deskriptif-Komparatif***

Meskipun tidak dapat diestimasi secara langsung dalam kerangka VECM, pertumbuhan industri manufaktur (X1) tetap merupakan faktor yang relevan secara teoritis dan empiris. Data historis menunjukkan korelasi positif antara ekspansi sektor manufaktur dan peningkatan emisi karbon di Indonesia, terutama di kawasan industri Jawa yang menjadi pusat aglomerasi manufaktur nasional. Prastiyo dan Hardyastuti (2020) menemukan hubungan kausalitas dua arah antara emisi dan sektor manufaktur, mengindikasikan bahwa hubungan ini bukan hanya searah tetapi saling mempengaruhi. Keterbatasan metodologis dalam penelitian ini di mana X1 tidak dapat dimasukkan dalam model VECM mendorong rekomendasi untuk penelitian lanjutan menggunakan pendekatan ARDL yang lebih fleksibel.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis menggunakan pendekatan Vector Error Correction Model (VECM) dengan data time series tahunan Indonesia periode 1990–2023, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut. Pertama, uji kointegrasi Johansen mengkonfirmasi adanya satu hubungan keseimbangan jangka panjang antara variabel polusi udara (Y), konsumsi listrik (X2), dan pendapatan penduduk (X3) di Indonesia, sehingga hipotesis $H_4$ terdukung secara empiris. Hal ini menunjukkan bahwa ketiga variabel bergerak bersama dalam jangka panjang dan tidak dapat menyimpang satu sama lain secara permanen. Kedua, pendapatan penduduk (X3) terbukti sebagai determinan utama polusi udara dalam jangka panjang dengan pengaruh positif yang sangat signifikan (koefisien 47,4119; p = 0,000). Temuan ini konsisten dengan fase awal Environmental Kuznets Curve dan mengkonfirmasi hipotesis $H_3$. Indonesia masih berada pada sisi kiri kurva EKC, di mana pertumbuhan ekonomi masih berasosiasi positif dengan peningkatan polusi udara. Ketiga, konsumsi listrik (X2) tidak berpengaruh signifikan terhadap polusi udara dalam jangka panjang (p = 0,878), sehingga hipotesis $H_2$ tidak terdukung dalam perspektif jangka panjang. Namun, konsumsi listrik berperan signifikan dalam dinamika penyesuaian jangka pendek, mengindikasikan relevansinya sebagai variabel kebijakan yang dapat memberikan dampak jangka pendek.Keempat, mekanisme koreksi kesalahan (ECT) bekerja dengan kecepatan penyesuaian 94,69% per tahun, mengindikasikan sistem yang sangat responsif dan stabil. Ketidakseimbangan jangka pendek antara polusi aktual dan keseimbangannya hampir seluruhnya terkoreksi dalam satu tahun. Kelima, pertumbuhan industri manufaktur (X1), meskipun tidak dapat diestimasi dalam kerangka VECM karena perbedaan ordo integrasi, tetap relevan secara teoritis sebagai determinan polusi udara di Indonesia berdasarkan kajian literatur dan analisis deskriptif.

## DAFTAR PUSTAKA

Bashir, A., Thamrin, K. M. H., Farhan, M., Mukhlis, M., & Atiyatna, D. P. (2019). The causality between human capital, energy consumption, $CO_2$ emissions, and economic growth: Empirical evidence from Indonesia. International Journal of Energy Economics and Policy, 9(2), 98–104.

Bekun, F. V., Alola, A. A., & Sarkodie, S. A. (2019). Toward a sustainable environment: Nexus between $CO_2$ emissions, resource rent, renewable and nonrenewable energy in 16-EU countries. Science of the Total Environment, 657, 1023–1029. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.104

Engle, R. F., & Granger, C. W. J. (1987). Co-integration and error correction: Representation, estimation, and testing. Econometrica, 55(2), 251–276.

Fitriani Ahmad, E., Yulizar, Y., Nasution, M. I., Nurahim, F., Karim, Z., Fauzan, R., Rachman, I., & Sianturi, J. (2026). Evaluation of ambient air quality at integrated waste processing facilities and its implications for workers. Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology, 9(1), 165–186. https://doi.org/10.25105/urbanenvirotech.v9i1.23029

Fujita, M., Krugman, P., & Venables, A. J. (1999). The spatial economy: Cities, regions and international trade. MIT Press.

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement (NBER Working Paper No. 3914). National Bureau of Economic Research. https://doi.org/10.3386/w3914

Kaya, Y. (1997). Environment, energy, and economy: Strategies for sustainability. United Nations University Press.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). (2023). Laporan kinerja ESDM 2022. Kementerian ESDM Republik Indonesia.

Krugman, P. (1991). Increasing returns and economic geography. Journal of Political Economy, 99(3), 483–499. https://doi.org/10.1086/261763

Panayotou, T. (2003). Economic growth and the environment. Economic Survey of Europe, 2, 45–72.

Pigou, A. C. (1920). The economics of welfare. Macmillan.

Prastiyo, S. E., & Hardyastuti, S. (2020). How agriculture, manufacture, and urbanization induced carbon emission? The case of Indonesia. Environmental Science and Pollution Research, 27, 42092–42103. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10148-w

Shahbaz, M., Tiwari, A. K., & Nasir, M. (2013). The effects of financial development, economic growth, coal consumption and trade openness on $CO_2$ emissions in South Africa. Energy Policy, 61, 1452–1459. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.006

Stern, D. I. (2011). The role of energy in economic growth. Annals of the New York Academy of Sciences, 1219(1), 26–51. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05921.x

Sugiawan, Y., & Managi, S. (2016). The environmental Kuznets curve in Indonesia: Exploring the potential of renewable energy. Energy Policy, 98, 187–198.