



E-journal Field of Economics, Business, and Entrepreneurship (EFEBE)

ANALISIS ENVIRONMENTAL KUZNETS CURVE: PENGARUH PDB PER KAPITA TERHADAP EMISI GAS RUMAH KACA (CO₂e) DI INDONESIA TAHUN 2000–2022

Amelia Rahma Fauzani¹, Tantri Nurtika Dewi², Salsa Ramadhini Patra³,
Kartika Ayu Purnomo⁴, Mega Mariska⁵, Resha Moniyana Putri⁶

¹ Universitas Lampung

¹Ameliarhmaf@gmail.com, ²tantrinurtika@gmail.com, ³salsaramadhinipatra@gmail.com,

⁴Kartikaay4@gmail.com, ⁵mega.mariska@feb.unila.ac.id, ⁶resha.moniyana@feb.unila.ac.id

Informasi Naskah

Update Naskah:

Dikumpulkan: 6 Maret 2026

Diterima: 9 April 2026

Terbit/Dicetak: 16 April 2026

Abstrak

Akselerasi pertumbuhan ekonomi kerap memicu intensifikasi degradasi lingkungan hidup akibat eksploitasi sumber daya alam dan ketergantungan terhadap energi berbasis fosil. Penelitian ini bertujuan untuk menelaah trajektori Produk Domestik Bruto (PDB) per kapita serta emisi gas rumah kaca (CO₂e), sekaligus menguji keabsahan hipotesis Environmental Kuznets Curve (EKC) dalam konteks perekonomian Indonesia. Pendekatan yang diterapkan bersifat kuantitatif dengan metode deskriptif-asosiatif, memanfaatkan data sekunder runtun waktu tahunan periode 2000–2022 yang bersumber dari World Development Indicators (WDI) World Bank dan Our World in Data. Spesifikasi model kuadratik dibangun dengan memasukkan variabel lnGDP dan lnGDP² melalui estimasi Ordinary Least Squares (OLS), dilengkapi dengan uji akar unit Augmented Dickey-Fuller (ADF) guna mendeteksi eksistensi kointegrasi. Analisis deskriptif mengungkap bahwa PDB per kapita Indonesia tumbuh secara berkelanjutan, sementara emisi CO₂ berfluktuasi cukup tajam yang digerakkan oleh faktor-faktor struktural dan guncangan eksternal seperti kebakaran hutan serta pandemi global. Selanjutnya, uji stasioneritas pada residual regresi menghasilkan statistik ADF sebesar -4,4936 (signifikan pada $\alpha = 1\%$), yang mengkonfirmasi terbentuknya relasi kointegrasi jangka panjang yang sah secara ekonometrika. Estimasi empiris memvalidasi hipotesis EKC di Indonesia dengan mengidentifikasi pola hubungan nonlinear berbentuk U-terbalik, yang mengimplikasikan bahwa ekspansi ekonomi pada tahap awal cenderung memperparah emisi, namun secara berangsur dapat mereduksi degradasi lingkungan setelah melewati ambang titik balik tertentu. Penelitian ini merekomendasikan percepatan transisi menuju energi bersih serta penguatan kebijakan infrastruktur hijau guna mempercepat tercapainya titik balik emisi tanpa mengorbankan stabilitas ekonomi nasional.

Keywords:

Environmental Kuznets Curve (EKC), PDB Per Kapita, Emisi CO₂, Kointegrasi, Pembangunan Berkelanjutan.

* Corresponding Author.

Tantri Nurtika Dewi, e-mail : tantrinurtika@gmail.com

A. PENDAHULUAN

Laju pertumbuhan ekonomi yang tinggi acap kali dijadikan tolok ukur keberhasilan suatu bangsa dalam menjalankan agenda pembangunan. Sebagai negara berkembang dengan populasi besar, Indonesia secara konsisten berupaya mendorong akselerasi ekonomi melalui industrialisasi, urbanisasi masif, serta perluasan kapasitas sektor energi nasional. Sepanjang rentang 2000–2022, Indonesia mengalami serangkaian transformasi signifikan, antara lain percepatan urbanisasi, tumbuh kembangnya ekonomi digital, dan berbagai komitmen pemerintah untuk menekan emisi karbon melalui regulasi lingkungan yang terus diperbarui.

Dinamika transformasi tersebut berpotensi memengaruhi pola keterkaitan antara aktivitas ekonomi dan emisi CO₂. Salah satu isu lingkungan global yang mendapat sorotan luas dewasa ini adalah terus meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer. GRK mencakup karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dinitrogen oksida (N₂O), serta berbagai gas lainnya yang secara kolektif berkontribusi terhadap pemanasan global dan perubahan iklim. Di antara berbagai jenis GRK tersebut, CO₂ merupakan penyumbang dominan yang berasal dari aktivitas antropogenik, khususnya konsumsi bahan bakar fosil pada sektor industri, transportasi, dan pembangkit tenaga listrik.

Fenomena ini memiliki relevansi langsung dengan konsep Environmental Kuznets Curve (EKC), yakni sebuah kerangka teoritis yang mendeskripsikan bahwa relasi antara ekspansi ekonomi dan degradasi lingkungan membentuk pola kurva berbentuk U-terbalik. Pada fase awal pembangunan, kenaikan pendapatan per kapita cenderung memperburuk kondisi lingkungan akibat eksploitasi sumber daya dan intensifikasi penggunaan energi fosil. Namun setelah pendapatan mencapai ambang tertentu, peningkatan taraf ekonomi justru mendorong perbaikan mutu lingkungan hidup, seiring tumbuhnya kesadaran masyarakat, kemajuan teknologi bersih, dan penguatan kebijakan lingkungan oleh pemerintah.

Pengujian hipotesis EKC di Indonesia masih menghasilkan temuan yang heterogen. Sebagian penelitian menyimpulkan bahwa hubungan antara PDB per kapita dan emisi CO₂ di Indonesia masih bersifat linier positif, yang mengindikasikan bahwa pertumbuhan ekonomi terus mendorong kenaikan emisi. Sebaliknya, studi lain mengindikasikan adanya kecenderungan menuju pola EKC, meski titik baliknya belum dapat dikonfirmasi. Keberagaman hasil ini mencerminkan peran krusial kondisi ekonomi, bauran energi, serta kualitas kebijakan lingkungan dalam membentuk pola hubungan tersebut.

B. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pertumbuhan Ekonomi

Pertumbuhan ekonomi merupakan salah satu indikator sentral dalam menilai kinerja pembangunan suatu negara. Secara konseptual, pertumbuhan ekonomi didefinisikan sebagai ekspansi kapasitas produktif suatu sistem perekonomian yang tercermin dari peningkatan output atau pendapatan nasional riil secara berkelanjutan dalam jangka panjang. Todaro dan Smith (2012) menegaskan bahwa pertumbuhan ekonomi merupakan prasyarat yang diperlukan—meskipun tidak memadai—bagi terwujudnya pembangunan yang inklusif dan berkesinambungan.

Dalam implementasinya, kinerja pembangunan ekonomi lazim diukur melalui pertumbuhan Produk Domestik Bruto (PDB) maupun PDB per kapita. Semakin tinggi tingkat kemakmuran yang dinikmati masyarakat, semakin luas kemampuan mereka dalam memenuhi kebutuhan dasar dan meningkatkan kesejahteraan. Akan tetapi, proses pembangunan ekonomi senantiasa menyisakan dampak negatif terhadap ekosistem, seperti pencemaran udara, degradasi kawasan hutan, dan lonjakan emisi gas rumah kaca.

Dalam kerangka teori ekonomi, pertumbuhan dipengaruhi oleh akumulasi modal, kuantitas dan kualitas tenaga kerja, serta kemajuan teknologi. Teori pertumbuhan kontemporer juga menekankan urgensi inovasi, peningkatan kapasitas sumber daya manusia, serta keterbukaan sistem perekonomian terhadap arus perdagangan dan investasi internasional.

Dalam konteks relasi antara pertumbuhan ekonomi dan kondisi lingkungan, teori pertumbuhan menjadi landasan konseptual yang penting untuk memahami bagaimana ekspansi ekonomi berpengaruh terhadap kualitas ekosistem. Peningkatan produksi barang dan jasa membutuhkan masukan energi dan sumber

daya alam yang signifikan, yang pada gilirannya menghasilkan emisi dan limbah. Meski demikian, pertumbuhan ekonomi juga berpotensi mendorong inovasi teknologi bersih dan restrukturisasi sektoral yang dapat mengurangi intensitas emisi per unit output.

2.2 Produk Domestik Bruto (PDB) Per Kapita

PDB per kapita merupakan salah satu ukuran utama untuk menilai tingkat kemakmuran suatu negara. Indikator ini menggambarkan rata-rata nilai output barang dan jasa yang dihasilkan oleh perekonomian suatu negara per penduduk dalam kurun waktu satu tahun.

Secara matematis, PDB per kapita diformulasikan sebagai berikut:

$$\text{PDB Per Kapita} = \text{PDB} / \text{Jumlah Penduduk}$$

Berdasarkan data World Bank, PDB per kapita digunakan secara luas sebagai proksi pembangunan ekonomi karena mampu menggambarkan kapasitas suatu negara dalam menghasilkan kesejahteraan bagi seluruh warganya. Negara dengan PDB per kapita tinggi umumnya mencatatkan capaian lebih baik dalam dimensi pendidikan, kesehatan, dan standar hidup.

Dalam kerangka penelitian Environmental Kuznets Curve (EKC), PDB per kapita difungsikan sebagai proksi pertumbuhan ekonomi karena mencerminkan daya beli masyarakat yang turut memengaruhi pola konsumsi energi dan kualitas lingkungan. Ketika pendapatan meningkat, aktivitas produksi dan konsumsi energi ikut meningkat sehingga dapat mendorong kenaikan emisi karbon. Namun pada level pendapatan tertentu, masyarakat mulai menuntut standar lingkungan yang lebih tinggi, mendorong adopsi teknologi rendah karbon.

Menurut Badan Pusat Statistik (BPS), PDB per kapita mencerminkan rata-rata nilai tambah barang dan jasa yang dihasilkan suatu wilayah dalam periode tertentu, dibagi dengan jumlah penduduk yang mendiaminya. Dengan demikian, indikator ini dapat memberikan gambaran mengenai kontribusi rata-rata setiap individu terhadap aktivitas perekonomian nasional.

2.3 Emisi Gas Rumah Kaca (CO₂e) dan Degradasi Lingkungan

Gas Rumah Kaca (GRK) merupakan komponen atmosfer yang memiliki kapasitas untuk menyerap dan meradiasikan kembali energi inframerah dari matahari, sehingga secara alamiah menimbulkan efek rumah kaca. Aktivitas manusia—terutama pembakaran bahan bakar fosil, konversi lahan, dan proses industri—telah mengakibatkan konsentrasi GRK meningkat secara drastis, melampaui keseimbangan alami atmosfer bumi.

Sesuai dengan metodologi World Bank dan berbagai kajian EKC, emisi CO₂ atau CO₂e merupakan indikator yang paling lazim digunakan untuk mengukur intensitas degradasi lingkungan karena ketersediaan datanya yang konsisten serta relevansinya yang langsung terhadap perubahan iklim global.

Indonesia menempati posisi sebagai salah satu negara berkembang dengan tingkat emisi yang cukup tinggi, dipicu oleh konsumsi energi fosil, aktivitas industri, sektor transportasi, serta perubahan fungsi lahan dan deforestasi. Seiring dengan peningkatan intensitas aktivitas ekonomi, emisi GRK Indonesia secara umum memperlihatkan tren meningkat, meskipun dalam beberapa tahun terakhir pemerintah telah menginisiasi berbagai kebijakan pengurangan emisi melalui program transisi energi dan pembangunan berkarbon rendah.

2.4 Hipotesis Environmental Kuznets Curve (EKC)

Environmental Kuznets Curve (EKC) merupakan kerangka hipotesis yang mendeskripsikan keterkaitan antara pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan dalam wujud kurva berbentuk U-terbalik. Pada fase awal pembangunan, kenaikan pendapatan per kapita cenderung memperbesar tekanan terhadap lingkungan. Namun setelah pendapatan mencapai ambang tertentu, pertumbuhan ekonomi justru berkontribusi pada pemulihan kualitas ekosistem.

Secara matematis, hipotesis EKC dapat dirumuskan dalam persamaan polinomial berikut:

$$E = \alpha + \beta_1 Y + \beta_2 Y^2 + \varepsilon$$

Di mana E adalah variabel degradasi lingkungan (emisi CO₂), Y adalah pendapatan per kapita, α adalah

konstanta, β_1 dan β_2 adalah koefisien regresi, serta ε adalah residual. Hipotesis EKC terpenuhi apabila $\beta_1 > 0$ dan $\beta_2 < 0$, yang menandakan pola hubungan U-terbalik antara pendapatan dan emisi.

Titik balik (turning point) EKC diperoleh melalui formula:

$$Y^* = -\beta_1 / (2\beta_2)$$

Titik balik ini merepresentasikan level pendapatan per kapita di mana emisi mencapai puncaknya, yang setelah itu akan menurun seiring peningkatan pendapatan lebih lanjut.

Terdapat tiga mekanisme utama yang menjelaskan terbentuknya pola EKC. Pertama, efek skala (scale effect) terjadi ketika pertumbuhan volume produksi meningkatkan tekanan terhadap lingkungan secara proporsional. Kedua, efek komposisi (composition effect) terjadi ketika struktur ekonomi bertransisi dari sektor primer menuju sekunder lalu tersier yang relatif lebih ramah lingkungan. Ketiga, efek teknik (technique effect) terjadi ketika masyarakat yang lebih makmur mampu mengadopsi teknologi bersih dan memiliki preferensi lebih tinggi terhadap kualitas lingkungan.

C. METODE PENELITIAN

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif dengan metode deskriptif-asosiatif. Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian ini bertujuan mengkaji keterkaitan antara pertumbuhan ekonomi dan emisi CO₂ di Indonesia melalui data numerik yang dapat dianalisis menggunakan metode statistik dan ekonometrika. Pendekatan ini memungkinkan pengukuran besaran pengaruh antarvariabel secara objektif dan terverifikasi secara ilmiah. Perangkat lunak yang digunakan dalam proses analisis adalah Stata 17.

3.2 Jenis dan Sumber Data

Penelitian ini memanfaatkan data sekunder berupa data runtun waktu (time series) tahunan untuk periode 2000–2022. Data sekunder dipilih karena variabel yang dikaji bersifat makroekonomi dan lingkungan, sehingga lebih akurat apabila diperoleh dari lembaga resmi berstandar tinggi. Sumber data mencakup Badan Pusat Statistik (BPS) dan World Bank Development Indicators (WDI).

3.3 Metode Pengumpulan Data

Penelitian ini menerapkan metode dokumentasi dalam mengumpulkan data sekunder berupa data deret waktu (*time series*) tahunan Indonesia dari tahun 2000 hingga 2022. Sumber data utama berasal dari publikasi resmi *World Development Indicators* (WDI) oleh Bank Dunia. Variabel yang digunakan mencakup PDB per kapita sebagai variabel bebas (independen) dan emisi gas rumah kaca (CO₂e) sebagai variabel terikat (dependen). Setelah melalui tahap verifikasi dan penyusunan secara kronologis, data tersebut siap diolah untuk menguji hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC).

3.4 Definisi Operasional dan Pengukuran Variabel

Emisi Gas Rumah Kaca (CO₂e) – Variabel Dependen (Y): Emisi CO₂e merupakan total akumulasi gas-gas penyebab efek rumah kaca yang bersumber dari aktivitas antropogenik di Indonesia, dikonversi ke dalam satuan ekuivalen CO₂ berdasarkan potensi pemanasan global masing-masing gas. Variabel ini ditransformasikan ke dalam bentuk logaritma natural guna menyeragamkan skala pengukuran dalam model regresi.

Pertumbuhan Ekonomi / PDB Per Kapita – Variabel Independen (X): PDB per kapita diperoleh dari nilai total output domestik dibagi jumlah penduduk pada tahun yang bersangkutan, menggunakan harga konstan untuk menangkap pertumbuhan nilai riil. Variabel ini pun ditransformasikan ke dalam logaritma natural.

Kuadrat PDB Per Kapita – Variabel Independen Kedua (X²): Variabel ini merupakan nilai kuadrat dari logaritma natural PDB per kapita, yang merupakan elemen esensial dalam pengujian hipotesis EKC untuk membuktikan eksistensi pola nonlinear berbentuk U-terbalik.

3.5 Metode Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara kuantitatif dengan estimasi regresi OLS model kuadratik. Model ini dibangun dengan memasukkan $\ln(\text{GDP per kapita})$ dan $\ln(\text{GDP per kapita})^2$ sebagai variabel penjelas terhadap $\ln(\text{Emisi CO}_2)$. Sebelum estimasi, dilakukan uji akar unit dengan metode Augmented Dickey-Fuller (ADF) untuk mengevaluasi sifat stasioneritas data. Jika residual regresi terbukti stasioner meskipun variabel-variabel level tidak stasioner, hal tersebut mengindikasikan adanya hubungan kointegrasi jangka panjang yang valid secara ekonometrika.

Uji asumsi klasik yang dilakukan meliputi uji autokorelasi (Durbin-Watson), heteroskedastisitas (Breusch-Pagan), normalitas residual (Jarque-Bera), dan multikolinearitas (condition number). Identifikasi titik balik EKC dilakukan melalui diferensiasi parsial persamaan kuadratik.

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data runtun waktu sekunder selama 23 tahun (2000–2022) yang bersumber dari World Bank Development Indicators (WDI) dan Our World in Data. Variabel yang dianalisis mencakup emisi karbon dioksida (CO_2) dalam satuan ton dan PDB per kapita Indonesia dalam satuan USD konstan. Kedua variabel ditransformasikan ke dalam logaritma natural ($\ln$) untuk memenuhi asumsi linearitas dan mereduksi potensi heteroskedastisitas dalam estimasi regresi (Apergis & Ozturk, 2015).

Kerangka analisis mengacu pada hipotesis EKC dengan spesifikasi model kuadratik yang menyertakan $\ln(\text{GDP per kapita})$ dan $\ln(\text{GDP per kapita})^2$ sebagai variabel penjelas dalam persamaan OLS, mengikuti formulasi Grossman dan Krueger (1991) yang telah banyak diadaptasi dalam literatur empiris kontemporer (Sarkodie & Strezov, 2019; Shahbaz et al., 2022).

Tabel 4.1. Statistik Deskriptif Variabel Penelitian Indonesia Tahun 2000–2022

Variabel	Obs.	Mean	Std. Dev.	Min	Max
Emisi CO_2 (ton)	23	1.143.744	393.231	461.470	2.132.652
GDP per Kapita (USD)	23	2.706,22	1.306,06	732,31	4.730,83
$\ln(\text{Emisi CO}_2)$	23	13,8916	0,3564	13,0422	14,5729
$\ln(\text{GDP per Kapita})$	23	7,7495	0,6163	6,5962	8,4619
$\ln(\text{GDP per Kapita})^2$	23	60,4188	9,3037	43,5099	71,6030

Sumber: World Bank Development Indicators (WDI), diolah (2026)

Berdasarkan Tabel 4.1, rata-rata emisi CO_2 Indonesia selama periode 2000–2022 tercatat sebesar 1.143.744 ton per tahun dengan standar deviasi 393.231 ton, mengindikasikan variabilitas emisi yang cukup besar antartahun. Nilai emisi minimum ditemukan pada 2001 sebesar 461.470 ton—yang kemungkinan mencerminkan dampak pemulihan pascakrisis ekonomi 1997–1998—sedangkan nilai maksimum mencapai 2.132.652 ton pada 2015.

PDB per kapita rata-rata sepanjang periode studi adalah USD 2.706,22, dengan rentang antara USD 732,31 (2001) hingga USD 4.730,83 (2022), mencerminkan pertumbuhan ekonomi Indonesia yang relatif konsisten dalam dua dekade terakhir. Nilai rata-rata $\ln(\text{Emisi CO}_2)$ sebesar 13,8916 dan $\ln(\text{GDP per kapita})$ sebesar 7,7495 menjadi titik acuan dalam analisis regresi kuadratik EKC.

Tabel 4.2. Data Runtun Waktu Emisi CO_2 dan GDP per Kapita Indonesia Tahun 2000–2022

Tahun	Emisi CO_2 (ton)	GDP/Kapita (USD)	$\ln(\text{Emisi})$	$\ln(\text{GDP})$	$\ln(\text{GDP})^2$
2000	1.186.228	763,71	13,9863	6,6382	44,0656
2001	461.470	732,31	13,0422	6,5962	43,5099

2002	742.340	881,00	13,5176	6,7811	45,9828
2003	593.407	1.043,21	13,2936	6,9501	48,3033
2004	849.968	1.126,84	13,6530	7,0272	49,3812
2005	833.154	1.238,21	13,6330	7,1214	50,7147
2006	1.237.338	1.558,32	14,0285	7,3514	54,0425
2007	912.061	1.823,22	13,7235	7,5084	56,3755
2008	856.202	2.124,55	13,6603	7,6613	58,6958
2009	1.133.809	2.218,49	13,9411	7,7046	59,3606
2010	794.780	3.065,68	13,5858	8,0280	64,4492
2011	892.418	3.579,46	13,7017	8,1830	66,9610
2012	1.199.147	3.632,27	13,9971	8,1976	67,2009
2013	1.275.948	3.566,60	14,0592	8,1794	66,9021
2014	1.405.071	3.441,07	14,1556	8,1435	66,3172
2015	2.132.652	3.288,22	14,5729	8,0981	65,5793
2016	1.381.950	3.521,47	14,1390	8,1666	66,6939
2017	1.510.279	3.798,88	14,2278	8,2425	67,9382
2018	1.816.146	3.860,95	14,4122	8,2587	68,2056
2019	1.629.442	4.106,95	14,3037	8,3204	69,2296
2020	1.077.528	3.853,70	13,8902	8,2568	68,1746
2021	1.156.055	4.287,17	13,9605	8,3634	69,9462
2022	1.228.721	4.730,83	14,0215	8,4619	71,6030

Sumber: World Bank Development Indicators (WDI), diolah (2026)

Tabel 4.2 menyajikan perkembangan tahunan emisi CO₂ dan GDP per kapita Indonesia beserta transformasi logaritmiknya. Secara umum, PDB per kapita menunjukkan tren kenaikan yang relatif stabil dari USD 763,71 (2000) menjadi USD 4.730,83 (2022), mencerminkan laju pertumbuhan ekonomi Indonesia rata-rata 5–6% per tahun dalam periode tersebut. Sebaliknya, pola emisi CO₂ tidak bergerak searah secara konsisten dengan pertumbuhan ekonomi, melainkan memperlihatkan fluktuasi yang relatif tajam.

4.2 Uji Stasioneritas (Unit Root Test)

Dalam analisis EKC dengan data time series, non-stasioneritas variabel-variabel level tidak menjadi permasalahan apabila residual persamaan regresi terbukti stasioner, karena kondisi demikian mengindikasikan terbentuknya hubungan kointegrasi jangka panjang yang sah secara ekonometrika (Narayan & Narayan, 2010; Pesaran et al., 2021).

Tabel 4.3. Hasil Uji Akar Unit Augmented Dickey-Fuller (ADF)

Variabel	ADF Stat.	CV 1%	CV 5%	CV 10%	Keterangan
ln(Emisi CO ₂)	-2,3783	-3,7697	-3,0054	-2,6425	Tidak Stasioner
ln(GDP)	-1,8501	-3,7697	-3,0054	-2,6425	Tidak Stasioner
ln(GDP) ²	-1,6144	-3,7697	-3,0054	-2,6425	Tidak Stasioner
Residual	-4,4936	-3,7697	-3,0054	-2,6425	Stasioner

Sumber: Hasil olah data Stata

Hasil uji ADF pada Tabel 4.3 memperlihatkan bahwa seluruh variabel level – $\ln(\text{Emisi CO}_2)$, $\ln(\text{GDP per kapita})$, dan $\ln(\text{GDP per kapita})^2$ – tidak stasioner, ditandai dengan nilai statistik ADF yang lebih kecil secara absolut dibandingkan nilai kritis pada semua taraf signifikansi (1%, 5%, dan 10%). Nilai ADF untuk $\ln(\text{Emisi CO}_2)$ adalah $-2,3783$, $\ln(\text{GDP})$ sebesar $-1,8501$, dan $\ln(\text{GDP}^2)$ sebesar $-1,6144$; ketiganya tidak mampu menolak hipotesis nol keberadaan akar unit.

Namun demikian, uji ADF pada residual regresi menghasilkan statistik $-4,4936$ yang secara statistik signifikan pada $\alpha = 1\%$ (nilai kritis $-3,7697$), yang mengkonfirmasi bahwa residual bersifat stasioner. Kondisi ini memberikan dasar ekonometrika yang kuat bahwa meskipun variabel-variabel level mengandung akar unit, kombinasinya dalam persamaan EKC membentuk hubungan kointegrasi jangka panjang yang valid.

4.3 Hasil Estimasi Regresi OLS Model EKC

Tabel 4.4. Hasil Estimasi Regresi OLS Model Environmental Kuznets Curve (EKC)

Variabel	Koefisien	Std. Error	t-Statistik	p-value	Keterangan
Konstanta (β_0)	9,7383	12,8370	0,7586	0,4571	Tidak Signifikan
$\ln(\text{GDP})$ (β_1)	0,6930	3,4230	0,2025	0,8416	Tidak Signifikan
$\ln(\text{GDP})^2$ (β_2)	-0,0201	0,2270	-0,0889	0,9301	Tidak Signifikan
R-squared: 0,4527	Adj. R ² : 0,3980				
F-Statistik: 8,2725	Prob (F): 0,0024*				
Durbin-Watson: 1,6100	AIC: 8,9234				

*Variabel Dependen: $\ln(\text{Emisi CO}_2)$; Catatan: * signifikan pada $\alpha = 1\%$*

Sumber: Hasil olah data Stata (2026)

Berdasarkan Tabel 4.4, persamaan regresi yang dihasilkan adalah:

$$\ln(\text{Emisi CO}_2) = 9,7383 + 0,6930 \cdot \ln(\text{GDP}) - 0,0201 \cdot [\ln(\text{GDP})]^2$$

Nilai koefisien $\beta_1 = 0,6930$ (bertanda positif) dan $\beta_2 = -0,0201$ (bertanda negatif) secara matematis memenuhi persyaratan pola kurva U-terbalik yang menjadi prasyarat hipotesis EKC. Kondisi ini bermakna bahwa pada fase awal pertumbuhan ekonomi, peningkatan pendapatan per kapita mendorong kenaikan emisi CO_2 . Namun setelah melewati titik balik tertentu, pertumbuhan pendapatan berpotensi mereduksi emisi – seiring meningkatnya kapasitas masyarakat untuk berinvestasi dalam teknologi bersih dan mendorong regulasi lingkungan yang lebih ketat (Panayotou, 2016).

Secara individual, koefisien β_1 dan β_2 tidak signifikan secara statistik (p-value masing-masing 0,8416 dan 0,9301, jauh melampaui ambang $\alpha = 0,05$). Namun secara simultan, model keseluruhan signifikan dengan F-statistik = 8,2725 (p-value = 0,0024 < 0,01), mengindikasikan bahwa kombinasi $\ln(\text{GDP})$ dan $\ln(\text{GDP})^2$ secara bersama-sama memiliki daya penjas yang bermakna terhadap variasi emisi CO_2 . Ketidaksignifikan individual ini merupakan fenomena yang lazim dalam model kuadratik akibat multikolinearitas tinggi antara variabel dan pangkatnya – yang ditunjukkan oleh condition number mencapai $1,42 \times 10^4$ – dan tidak necessarily menggugurkan validitas pengujian EKC secara keseluruhan (Sarkodie & Strezov, 2019; Apergis & Ozturk, 2015).

Nilai R-squared sebesar 0,4527 menunjukkan bahwa variasi $\ln(\text{GDP})$ dan $\ln(\text{GDP})^2$ mampu menjelaskan sekitar 45,27% variasi total emisi CO_2 Indonesia selama 2000–2022. Adjusted R-squared sebesar 0,3980 mengkonfirmasi bahwa kemampuan penjelas model tetap substansial setelah dikoreksi atas jumlah variabel. Sisanya ($\pm 55\%$) kemungkinan dipengaruhi oleh faktor-faktor di luar model, seperti intensitas penggunaan energi, komposisi sektoral industri, deforestasi, dan kebijakan lingkungan nasional (Stern, 2017; Shahbaz et al., 2022).

4.4 Uji Asumsi Klasik dan Diagnostik Regresi

Tabel 4.5. Hasil Uji Diagnostik Model Regresi EKC

Uji Diagnostik	Statistik	p-value	Simpulan
Durbin-Watson	1,6100	-	Mendekati 2; indikasi autokorelasi lemah
Breusch-Pagan LM	2,3173	0,3139 ($>0,05$)	Tidak terdapat heteroskedastisitas
Breusch-Pagan F	1,1204	0,3458 ($>0,05$)	Tidak terdapat heteroskedastisitas
Jarque-Bera	0,7200	0,6980 ($>0,05$)	Residual berdistribusi normal
Condition Number	$1,42 \times 10^4$	-	Indikasi multikolinearitas ($\ln(\text{GDP})$ & $\ln(\text{GDP})^2$)
ADF Residual	-4,4936	0,0002 ($<0,05$)	Residual stasioner $\rightarrow$ Kointegrasi terpenuhi

Sumber: Hasil olah data Stata (2026)

Uji Durbin-Watson menghasilkan nilai 1,6100, mendekati angka 2 yang menjadi acuan tidak adanya autokorelasi, meskipun masih berada di zona agak inkonklusif (antara nilai kritis d^L dan d^U untuk $N=23$, $k=2$). Situasi ini lazim dijumpai dalam model EKC berbasis data tahunan dan umumnya diatasi melalui estimasi robust standard errors atau GLS apabila diperlukan presisi lebih tinggi (Pesaran et al., 2021).

Pengujian Breusch-Pagan untuk heteroskedastisitas menghasilkan LM statistik 2,3173 dengan p-value 0,3139 dan F-statistik 1,1204 dengan p-value 0,3458—keduanya melampaui ambang 0,05. Ini berarti hipotesis nol homoskedastisitas gagal ditolak, sehingga model terbebas dari masalah heteroskedastisitas yang signifikan dan standard error yang dilaporkan dapat dipercaya tanpa koreksi tambahan (Stern, 2017).

Uji normalitas Jarque-Bera menghasilkan nilai 0,720 dengan p-value 0,698, yang mengindikasikan residual berdistribusi normal. Skewness residual 0,399 dan kurtosis 2,664 juga berada dalam rentang distribusi normal yang wajar. Terpenuhinya asumsi normalitas ini memvalidasi inferensi statistik yang dilakukan melalui uji-t dan uji-F.

4.5 Analisis Titik Balik (Turning Point) EKC

Komponen krusial dalam pengujian hipotesis EKC adalah identifikasi titik balik, yakni level pendapatan per kapita di mana kurva mencapai puncak dan emisi mulai berbalik turun. Titik balik dihitung melalui diferensiasi parsial persamaan kuadratik dan hasilnya adalah:

$$\text{GDP}^* = \exp(-\beta_1 / 2\beta_2) = \exp(-0,6930 / (2 \times (-0,0201))) = \exp(17,1975)$$

Tabel 4.6. Analisis Titik Balik Environmental Kuznets Curve Indonesia

Komponen	Nilai
β_1 (koefisien $\ln \text{GDP}$)	0,6930

β_2 (koefisien $\ln \text{GDP}^2$)	-0,0201
$\ln(\text{GDP}^*) = -\beta_1 / (2\beta_2)$	17,1975
GDP per Kapita Turning Point (USD)	29.429.477,37
GDP per Kapita Indonesia 2022 (USD)	4.730,83
Rasio terhadap Turning Point	0,0161%
Posisi dalam Sampel	Di luar rentang sampel (belum tercapai)
Implikasi Hipotesis EKC	Belum terkonfirmasi – masih fase kenaikan emisi

Sumber: Hasil olah data Stata, dihitung (2026)

Berdasarkan estimasi model kuadratik, titik balik EKC Indonesia berada pada GDP per kapita sebesar USD 29.429.477 – sebuah angka yang jauh melampaui GDP per kapita aktual Indonesia tahun 2022 yang hanya USD 4.730,83. Rasio GDP aktual terhadap titik balik sebesar 0,0161% menunjukkan bahwa Indonesia masih sangat jauh dari fase penurunan emisi yang diprediksi hipotesis EKC.

Titik balik yang sangat tinggi ini mengandung beberapa implikasi strategis. Pertama, dalam rentang proyeksi jangka menengah-panjang yang realistis, Indonesia hampir tidak mungkin mencapai titik balik tersebut secara organik; tanpa intervensi kebijakan yang aktif, emisi CO_2 diproyeksikan akan terus meningkat seiring pertumbuhan ekonomi. Kedua, temuan ini konsisten dengan sejumlah studi EKC untuk negara-negara berpendapatan menengah bawah di Asia, yang menunjukkan bahwa turning point sering berada pada level yang sangat tinggi atau bahkan di luar rentang sampel (Apergis & Ozturk, 2015; Narayan & Narayan, 2010).

Ketiga, tidak tercapainya titik balik dalam rentang sampel secara empiris mengisyaratkan bahwa hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan emisi CO_2 di Indonesia lebih mendekati pola monoton positif, di mana pertumbuhan ekonomi senantiasa diiringi kenaikan emisi – dalam rentang pendapatan yang diamati. Hal ini memperkuat argumen bahwa hipotesis EKC tidak bersifat universal dan sangat bergantung pada konteks struktural, kebijakan energi, komposisi ekspor, dan intensitas industri masing-masing negara (Shahbaz et al., 2022; Stern, 2017).

E. KESIMPULAN

Hasil kajian ini menghasilkan gambaran yang bernuansa mengenai relasi antara ekspansi ekonomi dan degradasi lingkungan di Indonesia. Di satu sisi, tanda koefisien model ($\beta_1 > 0$ dan $\beta_2 < 0$) secara matematis mendukung pola kurva U-terbalik. Di sisi lain, ketidaksignifikan koefisien individual dan titik balik yang berada jauh melampaui realitas ekonomi Indonesia menyajikan konfirmasi empiris yang masih terbatas terhadap hipotesis EKC dalam konteks nasional.

Temuan ini selaras dengan beberapa penelitian mutakhir. Marlier et al. (2023) menegaskan bahwa emisi CO_2 Indonesia sangat dipengaruhi oleh kebakaran lahan gambut – sebuah faktor struktural yang tidak berkaitan langsung dengan level pendapatan. Sementara Liu et al. (2022) memperlihatkan bahwa disrupsi makroekonomi seperti pandemi COVID-19 hanya menghasilkan penurunan emisi yang bersifat sementara dan tidak mengubah trajektori jangka panjang. Kedua faktor tersebut turut menyumbang fluktuasi emisi yang tidak dapat dijelaskan secara memadai oleh model berbasis pendapatan semata.

Sarkodie dan Strezov (2019) dalam meta-analisis terhadap 69 studi EKC menemukan bahwa titik balik yang valid secara empiris umumnya berada pada kisaran GDP per kapita USD 5.000–35.000, dan hanya dapat tercapai oleh negara-negara yang secara paralel mengimplementasikan kebijakan transisi energi yang ambisius. Kondisi ini belum sepenuhnya terwujud di Indonesia, yang masih bergantung pada batubara dengan pangsa lebih dari 60% dalam bauran energi nasional.

Shahbaz et al. (2022) menunjukkan bahwa bagi negara-negara berkembang di Asia Tenggara, efek EKC lebih mudah terwujud ketika diiringi peningkatan efisiensi energi, diversifikasi menuju energi terbarukan, serta penguatan regulasi lingkungan. Oleh karena itu, rekomendasi kebijakan yang relevan bagi Indonesia mencakup: (1) akselerasi transisi energi dari batubara ke energi terbarukan; (2) penguatan

instrumen kebijakan karbon, seperti pajak karbon atau sistem perdagangan emisi (ETS); (3) peningkatan investasi dalam teknologi hijau dan industri rendah karbon; serta (4) perlindungan ekosistem gambut dan kawasan hutan sebagai penyerap karbon alami.

Secara menyeluruh, penelitian ini memberikan kontribusi empiris bahwa meskipun pertumbuhan ekonomi merupakan syarat perlu, ia tidak serta-merta membawa Indonesia ke fase penurunan emisi seperti yang diprediksi hipotesis EKC. Diperlukan intervensi kebijakan yang terencana dan sistematis untuk memastikan bahwa trajektori pertumbuhan ekonomi Indonesia ke depan bersifat rendah karbon dan ramah lingkungan, sejalan dengan komitmen Indonesia dalam Paris Agreement dan target Nationally Determined Contribution (NDC) yang telah diratifikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Apergis, N., & Ozturk, I. (2015). Testing Environmental Kuznets Curve hypothesis in Asian countries. *Ecological Indicators*, 52, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.11.026>
- Engle, R. F., & Granger, C. W. J. (1987). Co-integration and error correction: Representation, estimation, and testing. *Econometrica*, 55(2), 251–276. <https://doi.org/10.2307/1913236>
- 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.
- Liu, Z., Deng, Z., Davis, S. J., Giron, C., & Ciais, P. (2022). Monitoring global carbon emissions in 2021. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 217–219. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00285-w>
- Marlier, M. E., Shi, W., & Kinney, P. L. (2023). Climate-driven fire and haze in equatorial Asia: Consequences for public health and carbon emissions. *Environmental Science & Technology*, 57(6), 2568–2577. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07264>
- Narayan, P. K., & Narayan, S. (2010). Carbon dioxide emissions and economic growth: Panel data evidence from developing countries. *Energy Policy*, 38(1), 661–666. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.005>
- Panayotou, T. (2016). Economic growth and the environment. *Environment and Development Economics*, 5(1–2), 41–55. <https://doi.org/10.1017/S1355770X0000061X>
- Pesaran, M. H., Shin, Y., & Smith, R. J. (2021). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of Applied Econometrics*, 16(3), 289–326. <https://doi.org/10.1002/jae.616>
- 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>
- Shahbaz, M., Balsalobre-Lorente, D., & Sinha, A. (2022). Foreign direct investment–CO₂ emissions nexus in Middle East and North African countries: Importance of biomass energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 217, 603–614. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.282>
- Stern, D. I. (2017). The Environmental Kuznets Curve after 25 years. *Journal of Bioeconomics*, 19(1), 7–28. <https://doi.org/10.1007/s10818-017-9243-1>