KAMPUS AKADEMIK PUBLISING
Jurnal Ilmiah Ekonomi Dan Manajemen (JIEM)
Vol.4, No.11 November 2026
e-ISSN: 3025-7859, p-ISSN : 3025-7972, Hal 108-121
DOI : https://doi.org/10.61722/jiem.v4i11.13258

Determinasi Emisi Karbon di Indonesia: Peran Pertumbuhan Ekonomi, Konsumsi Energi, dan Urbanisasi Periode 1990-2024

Cantika Junia Rachmani[1*], Rahma Fauziah[2], Silvi Fitriana Rahma[3], Dikri Maulana[4]
[1234]Program Studi Ekonomi Pembangunan, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Siliwangi, Jl. Siliwangi No. 24, Kelurahan Kahuripan, Kecamatan Tawang, Kota Tasikmalaya, Jawa Barat, Indonesia, 46115
*Penulis Korespondensi: 233401150@student.unsil.ac.id

Abstract. *Rising carbon dioxide (CO_2) emissions in Indonesia are closely linked to economic expansion, growing energy use, and rapid urban growth. This study aims to analyze the effects of Gross Domestic Product (GDP), energy consumption, and urbanization on carbon emissions in Indonesia from 1990 to 2024. Using annual secondary data from the World Development Indicators, the study applies the Autoregressive Distributed Lag (ARDL) approach to examine short-run and long-run relationships. The bounds test confirms cointegration among the variables. In the long run, energy consumption and urbanization have a positive and significant effect on carbon emissions, while GDP has no significant effect. In the short run, GDP and urbanization have a positive and significant effect, and the error correction term is negative and significant, indicating adjustment toward long-run equilibrium. Diagnostic tests show that the model is free from normality, autocorrelation, and heteroskedasticity problems and is structurally stable. These findings imply that emission mitigation in Indonesia requires improved energy efficiency, a faster transition to renewable energy, and sustainable urban planning to support climate action targets.*

Keywords: *ARDL; carbon emissions; energy consumption; gross domestic product; urbanization*

Abstrak. Peningkatan emisi karbon dioksida (CO_2) di Indonesia berkaitan erat dengan perluasan aktivitas ekonomi, kenaikan penggunaan energi, dan pesatnya pertumbuhan wilayah perkotaan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh Produk Domestik Bruto (PDB), konsumsi energi, dan urbanisasi terhadap emisi karbon di Indonesia pada tahun 1990-2024. Data yang digunakan adalah data sekunder tahunan dari World Development Indicators, yang dianalisis dengan pendekatan Autoregressive Distributed Lag (ARDL) untuk melihat hubungan jangka pendek dan jangka panjang. Hasil uji batas (bounds test) membuktikan adanya kointegrasi antar variabel. Dalam jangka panjang, konsumsi energi dan urbanisasi berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi karbon, sedangkan PDB tidak berpengaruh signifikan. Dalam jangka pendek, PDB dan urbanisasi berpengaruh positif dan signifikan, dan koefisien koreksi kesalahan bernilai negatif dan signifikan sehingga terjadi penyesuaian menuju keseimbangan jangka panjang. Uji diagnostik menunjukkan model terbebas dari masalah normalitas, autokorelasi, dan heteroskedastisitas, serta stabil secara struktural. Temuan ini mengimplikasikan bahwa pengendalian emisi di Indonesia memerlukan peningkatan efisiensi energi, percepatan transisi ke energi terbarukan, dan perencanaan kota yang berkelanjutan guna mendukung target aksi iklim.

Kata kunci: ARDL; emisi karbon; konsumsi energi; produk domestik bruto; urbanisasi

1. LATAR BELAKANG

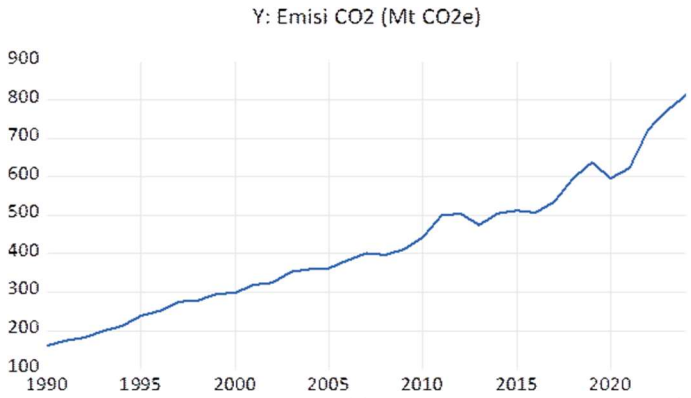
Perubahan iklim akibat akumulasi emisi gas rumah kaca (GRK) merupakan salah satu tantangan pembangunan global yang paling mendesak pada abad ke-21, terutama bagi negara berkembang yang tengah mengejar pertumbuhan ekonomi melalui industrialisasi dan urbanisasi yang pesat. Dalam kerangka pembangunan berkelanjutan, pengelolaan emisi karbon yang efektif menjadi indikator penting untuk menilai ketahanan lingkungan sekaligus kapasitas suatu negara dalam menyeimbangkan pertumbuhan ekonomi dengan kelestarian ekosistem global.

Naskah Masuk: 01 November 2026; Revisi: 02 November 2026; Diterima: 02 November 2026; Terbit: 03 November 2026

Isu tersebut sejalan dengan Agenda 2030 yang memuat 17 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*/SDGs) (United, 2015). Penanganan perubahan iklim menjadi mandat langsung SDG 13, sedangkan determinan emisi yang dikaji dalam penelitian ini berkaitan erat dengan tiga tujuan lain, yaitu SDG 8 tentang pekerjaan layak dan pertumbuhan ekonomi, SDG 7 tentang energi bersih dan terjangkau, serta SDG 11 tentang kota dan permukiman yang berkelanjutan. Keempat tujuan tersebut tidak selalu bergerak searah, sebab upaya mempercepat pertumbuhan ekonomi, memperluas akses energi, dan menampung penduduk perkotaan yang bertambah dapat meningkatkan emisi, sementara target SDG 8 sendiri menghendaki pertumbuhan ekonomi yang dipisahkan (*decoupling*) dari degradasi lingkungan (United, 2015). Namun, laporan terbaru menunjukkan bahwa hanya 35 persen target SDGs dengan data tren yang tersedia berada pada jalur atau menunjukkan kemajuan moderat, sedangkan hampir separuh lainnya bergerak terlalu lambat (United, 2025). Indonesia telah mengadopsi agenda ini melalui Peraturan Presiden Nomor 59 Tahun 2017 tentang Pelaksanaan Pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (republik pemerintahan Indonesia, 2017), sehingga pemahaman empiris mengenai determinan emisi karbon relevan untuk menilai keterpaduan pencapaian tujuan-tujuan tersebut.

Indonesia merupakan salah satu perekonomian terbesar di Asia Tenggara dengan populasi lebih dari 280 juta jiwa dan struktur industri yang terus bertransformasi dari basis agraris menuju basis manufaktur dan jasa. Sebagai anggota G20, Indonesia berkomitmen menurunkan emisi karbon melalui dokumen *Enhanced Nationally Determined Contribution* (E-NDC), yaitu penurunan emisi sebesar 32% dengan upaya sendiri pada tahun 2030, dengan visi mencapai *Net Zero Emission* pada tahun 2060 (Kementrian, 2023). Komitmen yang sejalan dengan SDG 13 ini menghadapi tantangan besar, mengingat berdasarkan basis data *Emissions Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR) yang dikelola Joint Research Centre Komisi Eropa bersama International Energy Agency, Indonesia menempati peringkat keenam sebagai penghasil emisi karbon terbesar di dunia pada tahun 2022, dengan total emisi mencapai 692,24 juta ton (Crippa et al., 2023).

Oleh sebab itu, emisi CO_2 dalam penelitian ini diposisikan sebagai variabel dependen yang mencerminkan tekanan lingkungan akibat aktivitas ekonomi domestik. Berdasarkan data *World Development Indicators* (WDI) yang dipublikasikan World Bank, emisi CO_2 Indonesia meningkat dari 161,8 juta ton CO_2 ekuivalen pada tahun 1990 menjadi 812,2 juta ton CO_2 ekuivalen pada tahun 2024, atau naik hampir lima kali lipat (Bank, 2025a). Tren tersebut ditunjukkan pada Gambar 1. Kenaikan emisi relatif konsisten sepanjang periode, dengan satu-satunya penurunan tercatat pada tahun 2020 akibat pelambatan aktivitas ekonomi selama pandemi COVID-19, sebelum kembali melonjak tajam pada 2021–2024.



Gambar 1. Tren Emisi CO_2 Indonesia, 1990-2024

Sumber: World Bank (2025a), diolah.

Kinerja emisi karbon Indonesia menghadapi berbagai tantangan struktural, khususnya terkait pertumbuhan ekonomi, konsumsi energi, dan urbanisasi yang terus meningkat. Produk Domestik Bruto (PDB) riil Indonesia tumbuh dari sekitar USD 270 miliar pada tahun 1990 menjadi lebih dari USD 1,24 triliun pada tahun 2024 (Bank, 2025b). Konsumsi energi turut meningkat signifikan, dari 279 kilogram setara minyak (kgoe) pada tahun 1990 menjadi 922 kgoe pada tahun 2024 (Data, 2026). Sementara itu, tingkat urbanisasi Indonesia meningkat dari 30,6% populasi tinggal di wilayah perkotaan pada tahun 1990 menjadi 58,8% pada tahun 2024 (Bank, 2025c). Dinamika ketiga variabel tersebut berpotensi memengaruhi emisi karbon Indonesia, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang.

Meskipun telah banyak studi meneliti hubungan antara pertumbuhan ekonomi, konsumsi energi, urbanisasi, dan emisi karbon, sebagian besar penelitian tersebut berfokus pada data panel lintas negara atau studi kasus negara di luar Asia Tenggara, seperti Turki dan kelompok negara berkembang secara umum. Studi deret waktu untuk Indonesia, seperti (Nihayah et al., 2022), berfokus pada urbanisasi bersama ekspor dan investasi asing langsung, menggunakan VECM, dengan data yang berakhir pada tahun 2019, sehingga kajian yang secara bersamaan menguji PDB, konsumsi energi, dan urbanisasi dengan pendekatan deret waktu (*time series*) tunggal jangka panjang hingga tahun 2024 menggunakan ARDL masih relatif terbatas, sehingga menjadi celah (*gap*) yang diisi oleh penelitian ini. Keterbatasan tersebut juga menyisakan kebutuhan bukti empiris bagi Indonesia mengenai bagaimana pencapaian SDG 8, SDG 7, dan SDG 11 berimplikasi pada SDG 13.

Oleh karena itu, penelitian ini berjudul "Determinasi Emisi Karbon di Indonesia: Peran Pertumbuhan Ekonomi, Konsumsi Energi, dan Urbanisasi Periode 1990-2024". Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh pertumbuhan ekonomi, konsumsi energi, dan urbanisasi terhadap emisi CO_2 Indonesia menggunakan pendekatan *Autoregressive Distributed Lag* (ARDL). Metode ini dipilih karena mampu menguji hubungan jangka pendek dan jangka panjang antarvariabel dengan tingkat integrasi berbeda (I(0) dan I(1)), serta memungkinkan uji kointegrasi *bounds testing* yang efisien dalam data deret waktu dengan jumlah observasi terbatas (Pesaran et al., 2001). Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi empiris terhadap literatur ekonomi lingkungan di Indonesia, sekaligus menjadi dasar bagi perumusan kebijakan mitigasi perubahan iklim yang mempertimbangkan dinamika urbanisasi sebagai salah satu determinan penting emisi karbon, guna mendukung pencapaian target *Net Zero Emission* serta kontribusi Indonesia

terhadap SDG 13 secara berkelanjutan, tanpa mengabaikan keterkaitannya dengan SDG 7, SDG 8, dan SDG 11.

2. KAJIAN TEORITIS

Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan bahwa urbanisasi dan aktivitas ekonomi berkaitan dengan emisi CO_2. (Nihayah et al., 2022) menemukan bahwa di Indonesia terdapat hubungan jangka panjang dengan emisi CO_2, serta kausalitas jangka pendek yang berjalan dari urbanisasi, pertumbuhan ekonomi, ekspor, dan investasi asing langsung menuju emisi CO_2. Sementara itu, (Pata, 2018) menemukan bahwa di Turki urbanisasi, bersama PDB per kapita dan konsumsi energi, berpengaruh positif signifikan terhadap emisi CO_2 dalam jangka panjang.

Secara teoretis, fenomena ini dapat dijelaskan melalui kerangka *Environmental Kuznets Curve* (EKC) yang pertama kali dikemukakan oleh (Grossman & Krueger, 1991), yang menyatakan bahwa tekanan lingkungan cenderung meningkat pada tahap awal pertumbuhan ekonomi sebelum akhirnya menurun setelah pendapatan per kapita melewati titik tertentu. Selain pertumbuhan ekonomi, konsumsi energi turut menjadi determinan emisi yang mapan dalam literatur, mengingat sebagian besar bauran energi Indonesia masih didominasi bahan bakar fosil. Di sisi lain, urbanisasi diduga berperan penting terhadap peningkatan emisi karbon melalui perubahan pola konsumsi energi rumah tangga, transportasi, serta ekspansi infrastruktur perkotaan.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain studi time series untuk menganalisis berbagai faktor sosial-ekonomi dan faktor antropogenik terhadap Emisi Karbon di Indonesia selama periode 1990-2024. Adapun variabel yang dianalisis meliputi Produk Domestik Bruto (PDB), konsumsi energi, dan urbanisasi. Penelitian ini bertujuan untuk menguji bagaimana faktor-faktor tersebut memengaruhi tekanan ekologis yang ditimbulkan oleh aktivitas manusia di tingkat nasional. Dengan cakupan data lebih dari tiga dekade, diharapkan penelitian ini dapat memberikan gambaran yang akurat dan mendalam mengenai dinamika hubungan antara pembangunan ekonomi dan keberlanjutan lingkungan.

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari sumber resmi *World Bank (World Development Indicator).* Adapun metode analisis yang digunakan adalah metode regresi Autoregressive Distributed Lag Model (ARDL) dengan bantuan *software* Eviews 12. Metode ARDL dipilih karena memiliki keunggulan dalam menangani data *time series* dengan derajat atau tingkat stasioneritas yang berbeda, baik pada level maupun pada *first difference* (Pesaran, 1995). Keunggulan lainnya adalah kemampuan untuk menghasilkan estimasi yang tidak bias dan secara simultan mendeteksi hubungan jangka pendek dan jangka panjang, bahkan dengan jumlah observasi yang terbatas.

Penggunaan model ARDL juga memungkinkan peneliti untuk membedakan secara jelas antara efek jangka pendek dan jangka panjang dari setiap variabel independen terhadap emisi karbon. Model ARDL yang didasarkan pada (Pesaran et al., 2001) dalam (A'yun et al., 2023) mensyaratkan adanya *Error Correction Model* (ECM) dengan metode penyesuaian dan koreksi kesalahan dalam jangka pendek untuk mencapai keseimbangan jangka panjang. Hal ini sangat penting dalam konteks kebijakan, karena memungkinkan pengambilan keputusan berdasarkan perspektif waktu yang lebih akurat. Selain itu, metode ini juga mengurangi risiko regresi palsu, yang seringkali menjadi masalah utama dalam analisis data time series.

Berikut model persamaan model ARDL:

$$LCO2_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{p} \varphi_i LCO2_{t-i} + \sum_{j=0}^{q1} \beta_{1j} LGDP_{t-j} + \sum_{k=0}^{q2} \beta_{2k} LEN_{t-k} + \sum_{m=0}^{q3} \beta_{3m} URB_{t-m} + \varepsilon_t$$

(Persamaan 1)

dimana LCO2 adalah logaritma natural emisi karbon, LGDP adalah logaritma natural PDB, LEN adalah logaritma natural konsumsi energi per kapita, URB adalah tingkat urbanisasi (persen dari total populasi), α0 adalah konstanta, φi adalah koefisien lag emisi karbon, β1j, β2k, dan β3m berturut-turut adalah koefisien PDB, konsumsi energi, dan urbanisasi beserta lag-nya, p, q1, q2, dan q3 adalah orde lag masing-masing variabel yang ditentukan berdasarkan Akaike Information Criterion (AIC), ε adalah error term yang diasumsikan white noise, dan t adalah tahun.

Model persamaan jangka pendek ECM:

$$\Delta LCO2_t = c + \sum_{i=1}^{p-1} \psi_i \Delta LCO2_{t-i} + \sum_{j=0}^{q1-1} \delta_{1j} \Delta LGDP_{t-j} + \sum_{k=0}^{q2-1} \delta_{2k} \Delta LEN_{t-k} + \sum_{m=0}^{q3-1} \delta_{3m} \Delta URB_{t-m} + \lambda ECT_{t-1} + \varepsilon_t$$

(Persamaan 2)

$$ECT_{t-1} = LCO2_{t-1} - \gamma_0 - \gamma_1 LGDP_{t-1} - \gamma_2 LEN_{t-1} - \gamma_3 URB_{t-1}$$

(Persamaan 3)

dimana Δ adalah operator first difference; c adalah konstanta jangka pendek; ψi, δ1j, δ2k, dan δ3m adalah koefisien jangka pendek; p, q1, q2, dan q3 adalah orde lag hasil seleksi AIC; ECTt−1 adalah residual hubungan jangka panjang (Persamaan 3) yang tertinggal satu periode; λ adalah koefisien koreksi kesalahan (speed of adjustment), yang harus negatif dan signifikan; dan εt adalah error term.

Tahapan analisis meliputi uji stasioneritas, uji kointegrasi, penentuan lag optimum, estimasi model, serta sejumlah uji asumsi klasik seperti normalitas, autokorelasi, heteroskedastisitas dan multikolinearitas untuk menjamin validitas model. Lalu uji stabilitas juga dilakukan guna memastikan hasil model konsisten sepanjang waktu. Selanjutnya diikuti dengan pengujian koefisien determinasi dan signifikansi untuk menilai kekuatan serta kelayakan model dalam menjelaskan variabel yang diteliti. Adapun penjelasan lebih lanjut tentang variabel dengan simbol, pengukuran, dan sumber data dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 1. Operasionalisasi Variabel

Variabel	Simbol	Pengukuran	Sumber
Emisi Karbon	CO2	Mt CO_2e (juta ton CO_2 ekuivalen)	World Bank - (WDI)
Produk Domestik Bruto	GDP	US$ konstan 2015	World Bank - (WDI)
Konsumsi Energi	EN	Kg setara minyak perkapita	World Bank - (WDI)
Urbanisasi	URB	% dari total populasi	World Bank - (WDI)

Sumber: World Bank, 2026

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian

Dalam melakukan regresi menggunakan model ARDL ini terdapat beberapa tahapan yang harus dipenuhi untuk melihat apakah data yang digunakan telah memenuhi persyaratan.

1. Tahapan Analisis Data

a. Uji Stasioneritas

Tabel 2. Hasil Pengujian *Unit Root* pada Tingkat Level

Variabel	ADF Test t-Statistic	Nilai Kritis (1 persen)	Nilai Kritis (5 Persen)	Nilai Kritis (10 persen)	Prob.	Keterangan
CO2	-1.265647	-3.653730	-2.957110	-2.617434	0.6331	Tidak Stasioner
GDP	-0.220115	-3.646342	-2.954021	-2.615817	0.9262	Tidak Stasioner
EN	-0.772664	-3.639407	-2.951125	-2.614300	0.8141	Tidak Stasioner
URB	-3.061215	-3.646342	-2.954021	-2.615817	0.0396	Stasioner

Sumber: Data diolah dengan Eviews 12

Tabel 3. Hasil Pengujian *Unit Root* pada Tingkat *First Difference*

Variabel	ADF Test t-Statistic	Nilai Kritis (1 persen)	Nilai Kritis (5 Persen)	Nilai Kritis (10 persen)	Prob.	Keterangan
CO2	-5.136799	-3.653730	-2.957110	-2.617434	0.0002	Stasioner
GDP	-4.357676	-2.646342	-2.954021	-2.615817	0.0016	Stasioner
EN	-5.798119	-3.646342	-2.954021	-2.615817	0.0000	Stasioner

Sumber: Data diolah dengan Eviews 12

Berdasarkan Tabel 2, hasil uji Augmented Dickey-Fuller (ADF) pada tingkat level menunjukkan bahwa variabel CO_2, GDP, dan EN belum stasioner, sedangkan variabel URB sudah stasioner. Hal ini berarti CO_2, GDP, dan EN masih mengandung akar unit pada tingkat level sehingga hipotesis nol tidak dapat ditolak, sementara URB telah bebas dari akar unit dan hipotesis nolnya ditolak.

Karena CO_2, GDP, dan EN tidak stasioner pada tingkat level, pengujian dilanjutkan pada tingkat first difference. Berdasarkan Tabel 3, seluruh variabel tersebut menjadi stasioner setelah dilakukan diferensiasi pertama, sehingga terintegrasi pada orde satu, I(1). Dengan demikian, variabel penelitian memiliki derajat integrasi campuran antara I(0) dan I(1) dan tidak ada variabel yang terintegrasi pada orde dua, sehingga model ARDL layak digunakan untuk analisis selanjutnya.

b. Uji Kointegrasi

Tabel 4. Hasil Uji Bounds

F-stat	K	Bound	Nilai Kritis			
			1%	2,5%	5%	10%
5.162187	3	I0	3,65	3,15	2,79	2,37
		I1	4,66	4,08	3,67	3,2

Sumber: Data diolah dengan Eviews 12

Berdasarkan Tabel 4, hasil uji bounds menunjukkan bahwa nilai F-statistik berada di atas batas atas nilai kritis pada seluruh tingkat signifikansi. Temuan ini mengonfirmasi adanya hubungan kointegrasi, yang mengindikasikan bahwa CO_2, GDP, EN, dan URB bergerak bersama menuju keseimbangan jangka panjang. Dengan demikian, hipotesis nol yang menyatakan tidak adanya hubungan jangka panjang ditolak.

c. Uji Lag Optimum

Tabel 5. Hasil Lima Model Teratas Berdasarkan Nilai AIC

Spesifikasi Model	AIC*
ARDL (2,1,2,1)	-3,67
ARDL (2,1,2,2)	-3,64
ARDL (2,1,2,0)	-3,63
ARDL (2,2,2,1)	-3,62

Sumber: Data diolah dengan Eviews 12

Keterangan: *Akaike Information Criterion

Berdasarkan hasil pemilihan model menggunakan Akaike Information Criterion (AIC) terhadap 20 spesifikasi model ARDL, diperoleh bahwa Model 11 dengan spesifikasi ARDL (2,1,2,1) memiliki nilai AIC paling rendah, yaitu sekitar -3,67. Selanjutnya, Model 10, Model 12, Model 2, dan Model 14 memiliki nilai AIC yang lebih tinggi. Karena model ARDL dengan nilai AIC terendah dianggap sebagai model yang paling optimal, maka ARDL (2,1,2,1) dipilih sebagai model terbaik untuk analisis selanjutnya.

d. Jangka Panjang Jangka Pendek

Tabel 6. Hasil Estimasi ARDL Jangka Pendek dan Jangka Panjang

Estimasi Jangka Pendek	**Koefisien**	**t-Stat**	**Prob.**
D(LCO2(-1))	0.446763	2.8461831	0.0091
D(LGDP)	0.355013	2.289283	0.0316
D(LEN)	-0.047718	-0.264842	0.7935
D(LEN(-1))	-0.445385	-1.978666	0.0600
D(URB)	0.249767	6.067082	0.0000
CointEq(-1)*	-1.077535	-5.504525	0.0000
Estimasi Jangka Panjang			
LGDP	-0.100759	-1.307208	0.2041
LEN	0.514556	3.103916	0.0050
URB	0.050782	6.864429	0.0000
C	2.796836	1.571718	0.1297

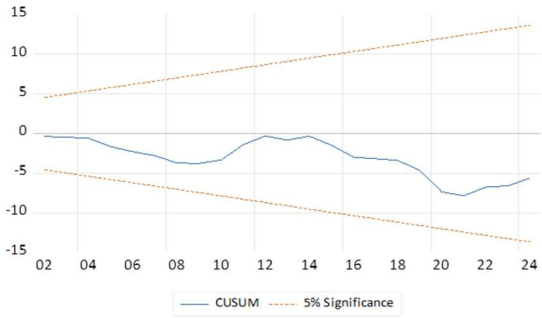
Sumber: Data diolah dengan Eviews 12

Berdasarkan Tabel 6, hasil estimasi jangka pendek menunjukkan bahwa dinamika emisi CO_2 dipengaruhi oleh emisi pada periode sebelumnya, yang berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi periode berjalan. Pertumbuhan ekonomi (GDP) dan urbanisasi (URB) juga berpengaruh positif dan signifikan, yang berarti peningkatan aktivitas ekonomi dan perluasan wilayah perkotaan segera diikuti oleh kenaikan emisi. Konsumsi energi (EN) pada periode berjalan tidak berpengaruh signifikan, sedangkan konsumsi energi satu periode sebelumnya berpengaruh negatif dengan tingkat signifikansi yang lebih lemah. Hasil ini mengindikasikan adanya penyesuaian dinamis dalam respons emisi terhadap perubahan konsumsi energi. Selain itu, koefisien Error Correction Term (ECT) bernilai negatif dan signifikan, sehingga setiap ketidakseimbangan jangka pendek akan terkoreksi menuju keseimbangan jangka panjang.

Pada estimasi jangka panjang, GDP tidak berpengaruh signifikan terhadap emisi CO_2. Hal ini menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi belum menjadi penentu utama emisi dalam jangka panjang. Sebaliknya, konsumsi energi berpengaruh positif dan

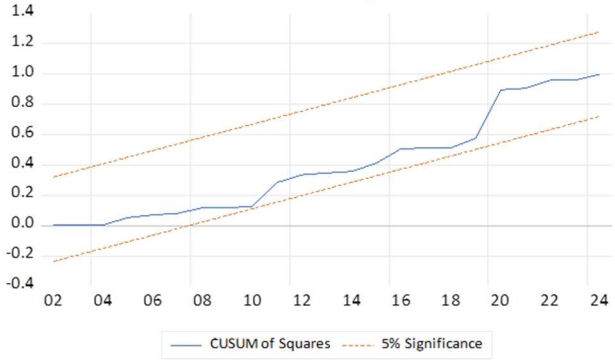
signifikan, yang menunjukkan bahwa semakin tinggi penggunaan energi, semakin besar emisi CO_2 yang dihasilkan. Demikian pula, urbanisasi berpengaruh positif dan signifikan, yang mengindikasikan bahwa perluasan wilayah perkotaan mendorong peningkatan emisi CO_2 dalam jangka panjang.

e. Uji Stabilitas



Gambar 2. CUSUM Test

Sumber: Data diolah dengan Eviews 12



Gambar 3. CUSUM of Squares Test

Sumber: Data diolah dengan Eviews 12

Berdasarkan hasil uji stabilitas model menggunakan CUSUM dan CUSUM of Squares, diketahui bahwa garis CUSUM dan CUSUM of Squares berada di dalam batas signifikansi 5% selama periode penelitian. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tidak terdapat perubahan struktural yang signifikan pada parameter model selama periode pengamatan. Dengan demikian, model yang digunakan dapat dinyatakan stabil dan hasil estimasi dapat digunakan untuk menganalisis hubungan antarvariabel dalam penelitian.

f. Uji Asumsi Klasik

Tabel 7. Hasil Uji Asumsi Klasik

Pengujian	Nilai	Prob.
Uji Jarque-Bera	0.231643	0.890634
Uji Correlation LM	1.139629	0.5656
Uji Breusch-Pagan-Godfrey	11.67167	0.2325
R-squared	0.994608	-
Adjusted R-Square	0.992497	-
F-statistic	471.3550	0.000000

Sumber: data diolah, Eviews 12, 2026

Berdasarkan Tabel 7, secara keseluruhan model telah memenuhi seluruh asumsi klasik. Uji Jarque-Bera menunjukkan bahwa residual berdistribusi normal, uji Correlation LM menunjukkan bahwa model bebas dari masalah autokorelasi, dan uji Breusch-Pagan-Godfrey menunjukkan bahwa tidak terjadi heteroskedastisitas atau varians residual

bersifat homoskedastis, karena seluruh nilai probabilitasnya berada di atas taraf signifikansi 5%. Dari sisi kebaikan model, Adjusted R-squared yang sangat tinggi menunjukkan bahwa sekitar 99,25% variasi emisi CO_2 dapat dijelaskan oleh variabel independen dalam model, dan F-statistik yang signifikan pada taraf % menegaskan bahwa seluruh variabel independen secara simultan berpengaruh signifikan terhadap emisi CO_2.

B. Pembahasan

1. Pengaruh Produk Domestik Bruto terhadap Emisi Karbon

Hasil temuan penelitian ini PDB dalam jangka panjang berpengaruh negatif namun tidak signifikan secara statistik terhadap emisi karbon dioksida (CO2). Artinya jika PDB meningkat sebesar 1% maka akan menurunkan emisi karbon dioksida (CO2) sebesar -10,08%. Berdasarkan penelitian ini, variabel pertumbuhan ekonomi tidak sejalan dengan hipotesis Environmental Kuznet Curve (EKC). Jika melihat struktur PDB Indonesia pada tahun 2024, perekonomian Indonesia masih didominasi oleh sektor industri pengolahan, yang memberikan kontribusi sebesar 18,98% terhadap PDB. Sementara itu, sektor pertanian, kehutanan, dan perikanan memberikan kontribusi sebesar 13,78% (Bps, 2026). Ini berarti bahwa bahwa sektor primer masih memiliki peranan penting dalam struktur perekonomian Indonesia.

Dalam perspektif *Environmental Kuznets Curve* (EKC), perekonomian Indonesia dapat dikatakan masih berada pada tahap pembangunan dan secara teori peningkatan pendapatan pada tahap awal pembangunan umumnya diikuti oleh meningkatnya tekanan terhadap lingkungan akibat aktivitas produksi dan konsumsi energi. Hal ini dapat dilihat dari tingkat pendapatan per kapita Indonesia yang masih relatif berada pada tahap menengah. Berdasarkan data World Bank, Produk Domestik Bruto (PDB) per kapita Indonesia pada tahun 2024 mencapai sekitar US$4.925,4, dan nilai tersebut masih berada di bawah estimasi *turning point* EKC untuk Indonesia yang ditemukan oleh penelitian terdahulu, yaitu sekitar US$7.729 per kapita.

Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa Indonesia belum mencapai tingkat pendapatan pada titik balik yang diestimasi dalam penelitian tersebut. Dengan demikian, peningkatan aktivitas ekonomi di Indonesia masih berpotensi disertai dengan peningkatan tekanan terhadap lingkungan, khususnya emisi CO_2, seiring dengan meningkatnya aktivitas produksi, konsumsi energi, dan penggunaan sumber daya. Maka hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi tidak berpengaruh terhadap peningkatan emisi CO2. Hasil penelitian ini sejalan dengan (Lesmana et al., 2024) bahwa peningkatan pertumbuhan ekonomi belum tentu menjadi pendorong utama perubahan emisi karbon secara langsung.

Berbeda dengan hasil estimasi jangka pendek, PDB berpengaruh positif dan signifikan pada 1 tahun sebelumnya dan pada tahun berjalan terhadap emisi karbon. Artinya setiap kenaikan PDB sebesar 1% menyebabkan peningkatan CO2 sebesar 44,68%. Ini menunjukkan bahwa dalam jangka pendek, kenaikan PDB secara konsisten meningkatkan emisi karbon, baik efeknya langsung terasa di tahun yang sama maupun masih berlanjut ke tahun berikutnya (efek lag). Ini sejalan dengan logika *scale effect* dalam EKC dimana pertumbuhan ekonomi jangka pendek didorong oleh peningkatan aktivitas produksi dan konsumsi energi, yang otomatis menaikkan emisi. Sejalan dengan hasil temuan (Wang & Huang, 2022) pada negara-negara Asia Timur. Menggunakan pendekatan Panel ARDL, temuannya mengonfirmasi bahwa dalam jangka pendek, peningkatan PDB per kapita periode berjalan dan lag satu periode secara konsisten meningkatkan emisi karbon.

Temuan ini mengindikasikan bahwasanya pertumbuhan ekonomi di Indonesia cenderung memberikan dampak negatif terhadap lingkungan. Terjadinya peningkatan PDB mencerminkan adanya peningkatan aktivitas produksi dan konsumsi sehingga memberikan dampak yang langsung terhadap eksploitasi energi, lahan, dan sumber daya alam lainnya. Secara teoritis, hasil ini memperkuat argumen bahwa pertumbuhan ekonomi di negara-negara berkembang seperti Indonesia masih berada pada tahap efek skala atau *scale effect,* di mana peningkatan output ekonomi berujung pada konsumsi sumber daya alam yang lebih besar serta degradasi lingkungan. Hal ini mengindikasikan bahwa transisi menuju efek teknik *technique effect* yaitu tahap ketika pertumbuhan ekonomi dibarengi dengan penggunaan teknologi yang lebih bersih dan efisien belum tercapai secara signifikan.

2. Pengaruh Konsumsi Energi terhadap Emisi Karbon

Hasil temuan penelitian ini menunjukkan bahwa konsumsi energi dalam jangka panjang berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi karbon dioksida (CO_2) di Indonesia. Artinya, jika konsumsi energi meningkat sebesar 1%, maka emisi CO_2 akan meningkat sekitar 0,84–0,92%, tergantung spesifikasi model dan periode penelitian (Almausshofi Almausshofi & Ambya Ambya, 2026); (Hwang & Yoo, 2014), Temuan ini mengonfirmasi bahwa peningkatan aktivitas ekonomi yang ditopang oleh penggunaan energi terutama dari sumber fosil turut mendorong tekanan terhadap lingkungan melalui kenaikan emisi GRK (Massagony & Budiono, 2023).

Jika melihat struktur pasokan energi nasional, sebagian besar konsumsi energi akhir di Indonesia masih didominasi oleh bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batubara, dan gas alam, yang secara langsung menghasilkan emisi CO_2 dalam jumlah signifikan (Massagony & Budiono, 2023). Data historis juga menunjukkan bahwa peningkatan konsumsi energi nasional yang didorong oleh pertumbuhan ekonomi, industrialisasi, dan urbanisasi terus diikuti oleh peningkatan emisi GRK (Hwang & Yoo, 2014); (Chontanawat, 2020) Dalam konteks ini, konsumsi energi masih menjadi salah satu faktor kunci yang menjelaskan dinamika emisi karbon di Indonesia (Hwang & Yoo, 2014).

Dalam perspektif *Environmental Kuznets Curve* (EKC), kondisi ini konsisten dengan tahap di mana perekonomian masih mengandalkan *scale effect*: pertumbuhan aktivitas ekonomi dan konsumsi energi belum sepenuhnya diimbangi oleh *technique effect* berupa adopsi teknologi bersih dan efisiensi energi yang memadai (Rahayuningrum, 2024); (Massagony & Budiono, 2023)

Secara sektoral, penelitian yang memisahkan konsumsi energi berdasarkan sektor industri, rumah tangga, dan transportasi menemukan bahwa ketiga sektor tersebut secara simultan berpengaruh terhadap emisi karbon, dengan koefisien yang cukup besar (Regina Citra Kurnia Pangestu & Anak Agung Ketut Ayuningsasi, 2024). Misalnya, konsumsi energi sektor industri dilaporkan memiliki elastisitas sekitar 0,919, yang berarti kenaikan 1% konsumsi energi sektor industri dapat meningkatkan emisi karbon sekitar 91,9% dengan asumsi *ceteris paribus* (Regina Citra Kurnia Pangestu & Anak Agung Ketut Ayuningsasi, 2024). Di sisi lain, beberapa studi dengan periode yang lebih pendek misalnya 2018-2023 menemukan bahwa konsumsi energi fosil tidak signifikan terhadap emisi karbon, yang dapat diinterpretasikan sebagai indikasi awal peningkatan efisiensi energi dan mulai berkembangnya pemanfaatan energi bersih (Dewi et al., 2025). Namun, secara keseluruhan literatur masih lebih banyak menyimpulkan bahwa konsumsi energi, khususnya dari sumber tak terbarukan, tetap menjadi pendorong utama emisi CO_2 di Indonesia (Massagony & Budiono, 2023); (Hwang & Yoo, 2014).

Temuan ini mengindikasikan bahwa pola konsumsi energi di Indonesia masih memberikan dampak negatif terhadap lingkungan. Peningkatan konsumsi energi mencerminkan intensifikasi aktivitas produksi, transportasi, dan konsumsi rumah tangga yang pada gilirannya meningkatkan eksploitasi sumber daya energi fosil (Regina Citra Kurnia Pangestu & Anak Agung Ketut Ayuningsasi, 2024); (Massagony & Budiono, 2023). Secara teoretis, hasil ini memperkuat argumen bahwa Indonesia masih berada pada tahap *scale effect*, di mana pertumbuhan ekonomi dan konsumsi energi belum sepenuhnya diimbangi oleh *technique effect* berupa teknologi lebih bersih, efisiensi energi, dan transisi ke energi terbarukan yang masif (Rahayuningrum, 2024); (Massagony & Budiono, 2023) Oleh karena itu, kebijakan yang fokus pada perubahan bauran energi, peningkatan efisiensi, dan insentif bagi energi terbarukan menjadi penting agar hubungan positif antara konsumsi energi dan emisi karbon dapat dilemahkan atau bahkan dibalik dalam jangka panjang (Massagony & Budiono, 2023); (Chontanawat, 2020).

3. Pengaruh Urbanisasi terhadap Emisi Karbon

Berdasarkan hasil estimasi ARDL, urbanisasi terbukti berpengaruh signifikan terhadap emisi karbon, dan arahnya positif. Dalam penelitian ini, kenaikan tingkat urbanisasi diikuti oleh meningkatnya emisi CO2, baik pada jangka panjang maupun jangka pendek. Dengan kata lain, makin banyak penduduk yang tinggal di kawasan perkotaan, makin besar pula emisi karbon yang dihasilkan, dan hubungan ini cukup kuat secara statistik untuk tidak dianggap kebetulan. Uji batas juga menunjukkan bahwa emisi karbon, PDB, konsumsi energi, dan urbanisasi bergerak bersama dalam jangka panjang. Koefisien koreksi kesalahan yang negatif dan signifikan memperlihatkan bahwa jika emisi menyimpang dari keseimbangannya, ia cenderung kembali menyesuaikan. Selain itu, model lolos uji autokorelasi dan heteroskedastisitas, sehingga hasilnya layak dipakai sebagai dasar pembahasan.

Pengaruh positif ini masuk akal jika dilihat dari cara kota bekerja. Pertumbuhan kota membuat kebutuhan listrik, transportasi, dan bangunan ikut membesar, dan sebagian besar kebutuhan itu masih dipenuhi dari energi berbasis fosil. Hal ini sejalan dengan temuan bahwa konsumsi energi juga berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi dalam jangka panjang. Menariknya, PDB tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan. Artinya, dalam data penelitian ini, naiknya emisi lebih banyak dipicu oleh perkembangan kawasan perkotaan dan pemakaian energi daripada oleh pertumbuhan ekonomi semata.

Temuan tersebut tidak berdiri sendiri. (Pata, 2018) yang meneliti Turki dengan ARDL *bounds testing* mendapati bahwa urbanisasi, bersama PDB per kapita, konsumsi energi, perkembangan keuangan, dan industrialisasi, meningkatkan emisi CO2 per kapita dalam jangka panjang. Bedanya, pada jangka pendek urbanisasi tidak termasuk variabel yang meningkatkan emisi, sementara pada penelitian ini urbanisasi tetap signifikan di jangka pendek. (Aslan et al., 2021) juga menggunakan data Turki dengan metode *Dynamic ARDL* dan memperoleh hubungan positif yang signifikan antara urbanisasi jangka panjang dan CO2. Sementara itu, (Udemba & Keleş, 2022) menemukan adanya kointegrasi jangka panjang dan menunjukkan bahwa bahan bakar fosil, industri, serta populasi perkotaan sama-sama berhubungan positif dengan emisi karbon. Dari ketiganya, tampak bahwa hasil penelitian ini konsisten dengan literatur sebelumnya. Implikasinya, pengelolaan kota perlu diarahkan pada transportasi publik, bangunan hemat energi, ruang terbuka hijau, dan pemanfaatan energi terbarukan agar pertumbuhan kota tidak terus menambah beban emisi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menganalisis pengaruh Produk Domestik Bruto (PDB), konsumsi energi, dan urbanisasi terhadap emisi karbon dioksida (CO_2) di Indonesia menggunakan model ARDL. Hasil pengujian menunjukkan bahwa model telah memenuhi persyaratan analisis, memiliki hubungan jangka panjang antar variabel, serta stabil dan bebas dari masalah asumsi klasik. Berdasarkan hasil estimasi, PDB berpengaruh negatif dan tidak signifikan terhadap emisi CO_2 dalam jangka panjang, tetapi berpengaruh positif dan signifikan dalam jangka pendek. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan aktivitas ekonomi jangka pendek masih mendorong peningkatan emisi karbon melalui aktivitas produksi dan konsumsi energi, sedangkan dalam jangka panjang pertumbuhan ekonomi belum menjadi faktor utama yang memengaruhi emisi CO_2.

Konsumsi energi berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO_2 dalam jangka panjang. Temuan ini menunjukkan bahwa tingginya ketergantungan pada energi, khususnya energi fosil, masih menjadi pendorong utama peningkatan emisi karbon di Indonesia. Sementara itu, urbanisasi berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO_2 baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang, karena pertumbuhan kawasan perkotaan meningkatkan kebutuhan energi, transportasi, dan pembangunan yang masih didominasi oleh energi berbasis fosil. Secara keseluruhan, konsumsi energi dan urbanisasi merupakan faktor yang lebih dominan dalam mendorong peningkatan emisi CO_2 di Indonesia dibandingkan pertumbuhan ekonomi. Oleh karena itu, diperlukan penguatan efisiensi energi, percepatan transisi energi terbarukan, serta pengembangan kota yang berkelanjutan melalui transportasi publik, bangunan hemat energi, dan pengendalian pembangunan perkotaan agar pertumbuhan ekonomi dan urbanisasi tidak terus meningkatkan emisi karbon.

Berdasarkan hasil penelitian, terdapat tiga saran kebijakan. Pertama, pengendalian emisi perlu difokuskan pada sisi energi. Pemerintah disarankan mempercepat transisi bauran energi ke sumber terbarukan, memperkuat standar efisiensi energi di sektor industri, transportasi, dan rumah tangga, serta memberikan insentif bagi investasi energi bersih agar pertumbuhan energi tidak lagi searah dengan pertumbuhan emisi. Kedua, perencanaan perkotaan perlu diarahkan pada pembangunan rendah karbon. Urbanisasi berpengaruh positif dan signifikan baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Pemerintah pusat dan daerah disarankan memprioritaskan transportasi publik massal, bangunan hemat energi, ruang terbuka hijau, dan pemanfaatan energi terbarukan dalam pengembangan kawasan perkotaan. Ketiga, kebijakan pertumbuhan ekonomi perlu dipisahkan dari peningkatan emisi (*decoupling*). PDB berpengaruh positif terhadap emisi dalam jangka pendek, sehingga ekspansi ekonomi perlu disertai penguatan teknologi bersih dan efisiensi produksi, sejalan dengan komitmen E-NDC dan target *Net Zero Emission* 2060.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan beberapa hal. Pertama, menambahkan variabel kuadrat PDB ($LGDP^2$) agar hipotesis EKC dapat diuji secara langsung dan titik baliknya dapat dihitung. Kedua, memasukkan variabel lain yang relevan, seperti porsi energi terbarukan, industrialisasi, investasi asing langsung, dan perkembangan keuangan. Ketiga, memperluas kajian ke tingkat sektoral atau ke negara-negara ASEAN dengan pendekatan panel agar temuan dapat dibandingkan lintas negara.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Ilmu Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Siliwangi, atas dukungan akademik selama proses penelitian ini. Penulis juga berterima kasih kepada dosen pembimbing atas arahan dan

masukan yang diberikan, serta kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penyusunan artikel ini.

DAFTAR REFERENSI

Almausshofi Almausshofi, & Ambya Ambya. (2026). The Impact of Renewable Energy, Energy Consumption, and Gross Domestic Product (GDP) on Carbon Dioxide (CO2) Emissions in Indonesia. *International Journal of Economics and Management Sciences*, *3*(2), 144–152. https://doi.org/10.61132/ijems.v3i2.1210

Aslan, A., Altinoz, B., & Ozsolak, B. (2021). The link between urbanization and air pollution in Turkey: evidence from dynamic autoregressive distributed lag simulations. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(37), 52370–52380. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14408-1

A'yun, I. Q., Nasir, M. S., Nasir, Z. A. bin, Abdulkarim, F. M., & Hussain, M. (2023). Testing the Environmental Kuznets Curve (EKC) Hypothesis in Indonesia and India: Autoregressive Distributed Lag (ARDL) Model Approach. *Jurnal Ekonomi Pembangunan: Kajian Masalah Ekonomi Dan Pembangunan*, *24*(2), 320–330. https://doi.org/10.23917/jep.v24i2.23191

Bank, W. (2025a). *Carbon dioxide (CO2) emissions (total) excluding LULUCF (Mt CO2e) – Indonesia*. World Bank. https://data.worldbank.org/indicator/EN.GHG.CO2.MT.CE.AR5?locations=ID

Bank, W. (2025b). *GDP (constant 2015 US$) – Indonesia*. World Bank. https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD?locations=ID

Bank, W. (2025c). *Urban population (% of total population) – Indonesia*. World Bank.

Bps. (2026). *Distribusi Persentase Produk Domestik Bruto Atas Dasar Harga Berlaku Menurut Lapangan Usaha (persen), 2024*. Badan Pusat Statistik. https://www.bps.go.id/id/statistics-table/3/T0UxS09GQlBTbk5QWTBNdlVWUmxSMjV3Y3l0VWR6MDkjMw==/distribusi-persentase-produk-domestik-bruto-atas-dasar-harga-berlaku-menurut-lapangan-usaha--persen---2021.html?year=2024

Chontanawat, J. (2020). Dynamic Modelling of Causal Relationship between Energy Consumption, CO2 Emission, and Economic Growth in SE Asian Countries. *Energies*, *13*(24), 6664. https://doi.org/10.3390/en13246664

Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf E., Becker, W., Monforti-Ferrario, F., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Brandao De Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., & Vignati, E. (2023). *GHG emissions from all countries, JRC, Pubblication of the European Union*. https://doi.org/10.2760/235266

Data, O. W. in. (2026). *Energy use per person*. Our World in Data. https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use

Dewi, B. S., Putri, Y. E., & Selvia, N. (2025). Pengaruh Industrialisasi, Foreign Direct Investment, Konsumsi Energi dan Keterbukaan Perdagangan terhadap Emisi Karbon dan Pertumbuhan Ekonomi di Indonesia. *Indonesian Research Journal on Education*, *5*(2). https://doi.org/10.31004/irje.v5i2.2297

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement*. https://www.nber.org/papers/w3914

Hwang, J.-H., & Yoo, S.-H. (2014). Energy consumption, CO2 emissions, and economic growth: evidence from Indonesia. *Quality & Quantity*, *48*(1), 63–73. https://doi.org/10.1007/s11135-012-9749-5

Indonesia, republik pemerintahan. (2017). *Inilah Perpres Pelaksanaan Pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan SDGs*. Sekretariat Kabinet Republik Indonesia. https://setkab.go.id/inilah-perpres-pelaksanaan-pencapaian-tujuan-pembangunan-berkelanjutan-sdgs/

Kementrian, E. (2023). *Indonesia Tetapkan E-NDC, Sektor Energi Miliki Target Tekan Emisi*

358 Juta CO2 di 2030. Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/indonesia-tetapkan-e-ndc-sektor-energi-miliki-target-tekan-emisi-358-juta-co2-di-2030

Lesmana, I., Astuty, S., & Jamil, Muh. (2024). Analisis Pengaruh Pertumbuhan Ekonomi, Foreign Direct Investment dan Konsumsi Energi Terhadap Kualitas Lingkungan di Indonesia : Ditinjau Dari Emisi Karbon Dioksida (CO2). *Jurnal EMT KITA*, *8*(3), 1205–1214. https://doi.org/10.35870/emt.v8i3.2905

Massagony, A., & Budiono. (2023). Is the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis valid on CO 2 emissions in Indonesia? *International Journal of Environmental Studies*, *80*(1), 20–31. https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2029097

Nihayah, D. M., Mafruhah, I., Hakim, L., & Suryanto, S. (2022). CO2 Emissions in Indonesia: The Role of Urbanization and Economic Activities towards Net Zero Carbon. *Economies*, *10*(4). https://doi.org/10.3390/economies10040072

Pata, U. K. (2018). The effect of urbanization and industrialization on carbon emissions in Turkey: evidence from ARDL bounds testing procedure. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(8), 7740–7747. https://doi.org/10.1007/s11356-017-1088-6

Pesaran, M. H. (1995). An Autoregressive Distributed-Lag Modelling Approach to Cointegration Analysis. In *Econometrics and Economic Theory in the 20th Century: The Ragnar Frisch Centennial Symposium* (pp. 371–413). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CCOL0521633230.011

Pesaran, M. H., Shin, Y., & Smith, R. J. (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of Applied Econometrics*, *16*(3), 289–326. https://doi.org/10.1002/jae.616

Rahayuningrum, S. T. (2024). Analysis of the Existence of Environmental Kuznets Curve (EKC) Hypothesis on CO2 Emission, Energy Consumption, and Economic Growth in Indonesia. *Journal of Economics Research and Social Sciences*, *8*(1), 38–52. https://doi.org/10.18196/jerss.v8i1.19310

Regina Citra Kurnia Pangestu, & Anak Agung Ketut Ayuningsasi. (2024). Pengaruh Konsumsi Energi Sektor Industri, Rumah Tangga, dan Transportasi terhadap Emisi Karbon di Indonesia. *Inisiatif: Jurnal Ekonomi, Akuntansi Dan Manajemen*, *3*(4), 297–311. https://doi.org/10.30640/inisiatif.v3i4.3154

Udemba, E. N., & Keleş, N. İ. (2022). Interactions among urbanization, industrialization and foreign direct investment (FDI) in determining the environment and sustainable development: new insight from Turkey. *Asia-Pacific Journal of Regional Science*, *6*(1), 191–212. https://doi.org/10.1007/s41685-021-00214-7

United, N. (2015). *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*.

United, N. (2025). The Sustainable Development Goals Report. *United Nations*, 1–51. https://unstats.un.org/sdgs/report/2025/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2025.pdf

Wang, Y., & Huang, Y. (2022). Impact of Foreign Direct Investment on the Carbon Dioxide Emissions of East Asian Countries Based on a Panel ARDL Method. *Frontiers in Environmental Science*, *10*(June), 1–10. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.937837