

# ANALISIS HUBUNGAN JANGKA PENDEK DAN JANGKA PANJANG ANTARA PDB, ALIH FUNGSI LAHAN, ENERGI TERBARUKAN TERHADAP EMISI KARBON: PENDEKATAN ARDL

Antradiva Oktaviola Puspita, Avi Budi Setiawan  
Ekonomi Pembangunan, Fakultas Ekonomika dan Bisnis, Universitas Negeri Semarang  
Corresponding e-mail: [avibs@mail.unnes.ac.id](mailto:avibs@mail.unnes.ac.id)

Copyright © 2025 The Author



This is an open access article

Under the Creative Commons Attribution Share Alike 4.0 International License

DOI: 10.53866/jimi.v5i1.761

## Abstract

*This study analyzes the relationship between economic growth, land use change, renewable energy, and carbon dioxide emissions in Indonesia using the Autoregressive Distributed Lag (ARDL) approach. The study aims to identify the short- and long-term impacts of these variables on carbon emissions, providing a more comprehensive understanding of environmental sustainability and climate change mitigation policies. The results of the analysis show that in the short term, an increase in Gross Domestic Product (GDP) contributes to a decrease in carbon emissions, which can be attributed to technological advancements as well as stricter environmental policies. However, in the long run, economic growth tends to increase carbon emissions, reflecting the challenges of transitioning to cleaner energy. In addition, land conversion in the short term is shown to reduce carbon emissions, but in the long term shows no significant impact, indicating that unsustainable land conversion can hinder climate change mitigation efforts. Renewable energy use is also shown to reduce carbon emissions in the short term, although in the long term the effect is not significant, indicating the need for stronger strategies to increase the effectiveness of green energy.*

**Keywords:** Carbon dioxide emissions, Gross Domestic Product, ARDL (Autoregressive Distributed Lag)

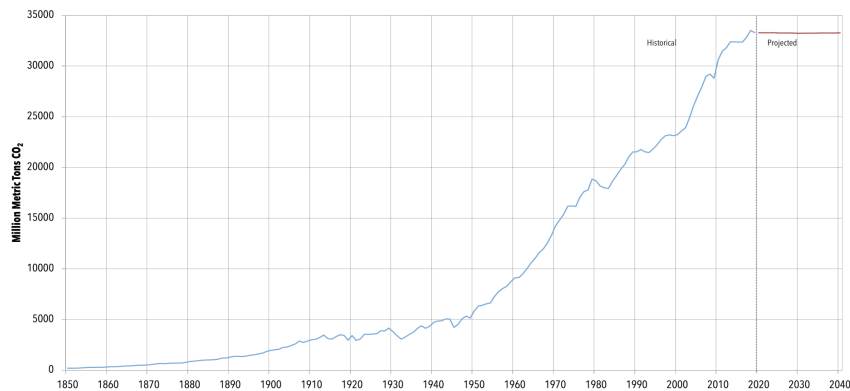
## Abstrak

Penelitian ini menganalisis hubungan antara pertumbuhan ekonomi, alih fungsi lahan, energi terbarukan, dan emisi karbon dioksida di Indonesia dengan menggunakan pendekatan Autoregressive Distributed Lag (ARDL). Studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi dampak jangka pendek dan jangka panjang dari variabel-variabel tersebut terhadap emisi karbon, guna memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terkait keberlanjutan lingkungan dan kebijakan mitigasi perubahan iklim. Hasil analisis menunjukkan bahwa dalam jangka pendek, peningkatan Produk Domestik Bruto (PDB) berkontribusi terhadap penurunan emisi karbon, yang dapat dikaitkan dengan kemajuan teknologi serta kebijakan lingkungan yang lebih ketat. Namun, dalam jangka panjang, pertumbuhan ekonomi justru cenderung meningkatkan emisi karbon, mencerminkan tantangan dalam transisi energi yang lebih bersih. Selain itu, alih fungsi lahan dalam jangka pendek terbukti menurunkan emisi karbon, tetapi dalam jangka panjang tidak menunjukkan dampak yang signifikan, mengindikasikan bahwa konversi lahan yang tidak berkelanjutan dapat menghambat upaya mitigasi perubahan iklim. Penggunaan energi terbarukan juga terbukti mampu menekan emisi karbon dalam jangka pendek, meskipun dalam jangka panjang efeknya tidak signifikan, yang menunjukkan perlunya strategi lebih kuat dalam meningkatkan efektivitas energi hijau.

**Kata Kunci:** Emisi Karbon dioksida, Produk Domestik Bruto, ARDL (Autoregressive Distributed Lag)

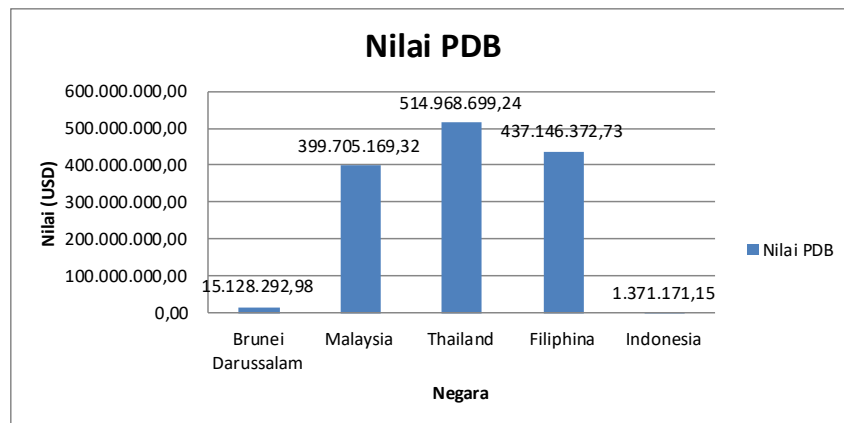
### 1. Pendahuluan

Pemanasan global merupakan tantangan besar yang memerlukan perhatian serius untuk mencapai keberlanjutan lingkungan dalam jangka panjang. Banyak faktor yang memengaruhi terjadinya pemanasan global, namun salah satu kontributor utamanya adalah peningkatan emisi gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang terus meningkat seiring dengan berjalannya waktu. Dampak dari lonjakan emisi ini sangat besar, mulai dari kekeringan, penurunan luas lahan yang dapat digunakan, hingga eskalasi suhu global yang dapat mengancam kelangsungan hidup manusia. Peningkatan emisi karbon dioksida ini sebagian besar disebabkan oleh proses pembangunan ekonomi yang semakin intensif, tanpa diimbangi dengan upaya mitigasi yang memadai untuk mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan.



Gambar 1. Grafik Perkembangan Total Emisi Karbin Dioksida CO<sup>2</sup> Dunia  
Sumber : Global Carbon Project, 2023

Berdasarkan laporan Global Carbon Project (2023), emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) global mencapai rekor tertinggi pada tahun 2022, dengan total sekitar 36,8 miliar ton. Sebagian besar emisi ini dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam yang menyumbang sekitar 89% dari total emisi CO<sub>2</sub> dunia. Sektor energi tetap menjadi penyumbang utama, diikuti oleh industri, transportasi, dan deforestasi. Sejumlah penelitian Bergougui et al (2024), Tu et al (2022), Fernández Fernández et al (2024) menunjukkan bahwa pemanasan global sering kali dikaitkan dengan ketimpangan perekonomian dalam distribusi dampaknya. Indonesia, sebagai negara berkembang, memiliki ketahanan ekonomi yang relatif lebih rendah, sehingga lebih rentan terhadap perubahan lingkungan yang semakin intensif.



Gambar 2. Diagram perkembangan nilai Produk Domestik Bruto dalam satuan US\$ Dollar  
Sumber : (World Bank, 2024)

Berdasarkan data pada gambar, Indonesia memiliki PDB sebesar 1.371.171,15 (dalam satuan miliar US Dolar). Angka ini jauh lebih rendah dibandingkan dengan negara-negara ASEAN lainnya, seperti Thailand US\$ 514.968.699,24, Filipina US\$ 437.146.372,73, Malaysia US\$ 399.705.169,32, dan Brunei Darussalam US\$ 15.128.292,98. Perbedaan yang signifikan ini menunjukkan bahwa Indonesia memiliki tingkat PDB yang jauh lebih kecil dibandingkan negara-negara tersebut. Hal ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk struktur ekonomi yang masih berkembang, ketergantungan pada sektor dengan nilai tambah rendah, serta tantangan dalam peningkatan efisiensi dan produktivitas. Ditemukan fakta bahwa Indonesia berkontribusi sekitar 2,1 persen terhadap total emisi karbon dioksida global, tingkat PDB yang rendah menunjukkan adanya ketidakseimbangan dalam pemanfaatan sumber daya untuk pertumbuhan ekonomi yang lebih berkelanjutan (Crippa, M., et al., 2023). Selama aktivitas perekonomian terus berlangsung, permasalahan emisi karbon dapat diatasi dengan strategi yang mengutamakan penggunaan lahan penyerap karbon secara efisien

Namun, perubahan penggunaan lahan di Indonesia masih didominasi oleh praktik alih fungsi yang semakin marak terjadi. Konversi lahan yang sebelumnya berperan sebagai penyerap emisi CO<sub>2</sub> sering kali dialihkan menjadi kawasan dengan kapasitas penyerapan karbon yang lebih rendah, seperti perkebunan kelapa sawit dan pertambangan, yang pada akhirnya mengurangi luas lahan sehat (Murphy, 2024). Penelitian Sun & Liu (2024) mengungkap bahwa wilayah dengan pembangunan berbasis ekologi, seperti di bagian Selatan, cenderung menghasilkan emisi yang lebih rendah dibandingkan dengan wilayah timur yang mengalami alih fungsi lahan dalam skala besar dan menunjukkan tingkat emisi CO<sub>2</sub> yang lebih tinggi. Data Badan Pusat Statistik (2023) juga mengonfirmasi tren ini, di mana luas penutupan lahan tercatat sebesar 187.751,9 hektare pada tahun 2020, meningkat menjadi 187.679,0 hektare pada tahun 2021, sebelum sedikit berkurang menjadi 187.587,6 hektare di tahun 2022.

Sebagaimana disebutkan sebelumnya, sektor transportasi dan pertambangan merupakan kontributor utama emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Jika Indonesia tidak segera mengadopsi dan memperbarui sistem teknologinya dengan solusi berbasis energi terbarukan, maka potensi peningkatan emisi CO<sub>2</sub> akan semakin besar. Ketergantungan pada bahan bakar fosil yang tinggi dapat memperparah dampak perubahan iklim serta menambah beban lingkungan dan kesehatan masyarakat (Romanello et al., 2022). Perbaikan emisi karbon dioksida melalui energi terbarukan mempercepat peluang dalam pencapaian target nol emisi. Hal ini mendukung dalam peningkatan efisiensi energi dan ketahanan energi nasional.

Secara fundamental, pertumbuhan ekonomi yang aktif justru dapat berperan dalam menurunkan emisi karbon dan meningkatkan kelestarian lingkungan. Dengan meningkatnya pendapatan negara, pemerintah memiliki kapasitas lebih besar untuk mengalokasikan sumber daya dalam upaya perbaikan lingkungan, salah satunya melalui transformasi energi menuju sumber yang lebih bersih dan terbarukan. Dalam skenario ini, alih fungsi lahan tidak menjadi keharusan, melainkan optimalisasi lahan yang sudah ada dengan penerapan teknologi terbaru.

Hubungan antara pendapatan dan kelestarian lingkungan juga telah dikaji dalam teori Environmental Kuznets Curve (EKC). Teori ini menjelaskan bahwa pada tahap awal pertumbuhan ekonomi, emisi cenderung meningkat seiring dengan aktivitas industri dan eksploitasi sumber daya alam (Laureate et al., 1996). Namun, setelah mencapai tingkat pendapatan tertentu, kesadaran dan investasi dalam teknologi ramah lingkungan meningkat, sehingga berkontribusi pada penurunan emisi karbon serta perbaikan kualitas lingkungan.

Indonesia telah berkomitmen dalam upaya pengurangan emisi karbon dioksida dengan bergabung dalam *Paris Agreement* guna mencapai target nol emisi. Selain itu, Indonesia juga berpartisipasi dalam perjanjian yang lebih spesifik terkait pengurangan emisi, yakni *Glasgow Climate Pact*, yang disepakati dalam *COP26* di Glasgow, Skotlandia, pada November 2021. Kesepakatan ini bertujuan mempercepat aksi global dalam menghadapi perubahan iklim dan menjadi kelanjutan dari *Paris Agreement*, dengan penekanan pada mitigasi, adaptasi, serta pendanaan iklim (UNFCCC, 2021). Salah satu poin penting dalam perjanjian ini adalah komitmen untuk menekan kenaikan suhu global hingga 1,5°C, yang dianggap lebih ideal dibandingkan batas 2°C sebagaimana tertuang dalam *Paris Agreement*. Selain itu, negara-negara maju juga didorong untuk memenuhi komitmen pendanaan iklim sebesar USD 100 miliar per tahun guna mendukung negara berkembang dalam upaya mitigasi dan adaptasi terhadap dampak perubahan iklim.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan dari studi sebelumnya Vogel & Hickel (2023) Mikayilov et al (2018) yang hanya meneliti hubungan antara Produk Domestik Bruto (PDB) dan emisi CO<sub>2</sub>. Sebagai upaya memperkaya temuan ilmiah, penelitian ini menghadirkan kebaruan dengan menambahkan

variabel alih fungsi lahan dan energi terbarukan. Pendekatan *Autoregressive Distributed Lag* (ARDL) digunakan dalam analisis ini, karena mampu mengevaluasi hubungan antarvariabel dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai keterkaitan antara pertumbuhan ekonomi, perubahan penggunaan lahan, serta peralihan menuju energi berkelanjutan.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Objek, waktu dan Tempat

Penelitian ini berfokus pada analisis hubungan antara pertumbuhan ekonomi, alih fungsi lahan, energi terbarukan, dan emisi karbon dioksida di Indonesia. Data yang digunakan dalam penelitian ini mencakup periode tahun 1990 hingga 2023. Studi ini dilakukan dengan menggunakan data sekunder yang diperoleh dari sumber terpercaya seperti World Bank dan Our World in Data.

### 2.2. Teknik Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data runtut waktu (time series) yang dikumpulkan dari berbagai sumber sekunder. Data mengenai emisi karbon dioksida diperoleh dari Global Carbon Project, sementara data terkait Produk Domestik Bruto (PDB), alih fungsi lahan, dan penggunaan energi terbarukan diperoleh dari World Bank, Badan Pusat Statistik (BPS), serta publikasi akademik lainnya. Selain itu, studi literatur juga digunakan untuk mendukung analisis konseptual penelitian ini.

### 2.3. Teknik Analisis Data

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif dengan menggunakan beberapa variabel utama, yaitu Emisi Karbon Dioksida, Produk Domestik Bruto (PDB), Alih Fungsi Lahan, dan Energi Terbarukan, yang berperan dalam menganalisis keterkaitan antara pertumbuhan ekonomi dan dampaknya terhadap lingkungan. Dalam model yang digunakan, Emisi Karbon Dioksida berfungsi sebagai variabel dependen, sementara PDB, Alih Fungsi Lahan, dan Energi Terbarukan bertindak sebagai variabel independen.

Untuk menganalisis hubungan jangka pendek dan jangka panjang antarvariabel tersebut, penelitian ini menerapkan metode Autoregressive Distributed Lag (ARDL). Model ARDL merupakan kombinasi dari dua pendekatan, yaitu Auto Regressive (AR) dan Distributed Lag (DL). Model AR menggunakan satu atau lebih nilai historis dari variabel terikat, sedangkan model DL mengaitkan regresi antara variabel bebas saat ini dengan nilai masa lalu (lagged) dari variabel yang sama (Kripfganz & Schneider, 2023). Dengan pendekatan ini, model ARDL mampu menyesuaikan keterlambatan efek perubahan variabel independen terhadap variabel dependen serta memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terkait dinamika jangka pendek maupun jangka panjang.

Sehingga diperoleh model persamaan awal ARDL :

$$Y_t = \alpha + \sum_{i=1}^p \beta_i Y_{t-1} + \sum_{j=0}^q \delta_j X_{t-j} + \varepsilon_t$$

Model Autoregressive Distributed Lag (ARDL) digunakan untuk menganalisis hubungan antara variabel dependen dan variabel independen dengan mempertimbangkan efek jangka pendek serta jangka panjang. Dalam penelitian ini, variabel Emisi Karbon Dioksida digunakan sebagai variabel dependen ( $Y_t$ ) yang berarti nilai dari variabel ini bergantung pada faktor-faktor lain yang dijadikan sebagai variabel independen ( $X_t$ ) yaitu Produk Domestik Bruto (PDB), Alih Fungsi Lahan, dan Energi Terbarukan. Dalam model ARDL, terdapat konstanta ( $\alpha$ ) yang merepresentasikan nilai dasar atau titik awal dari hubungan antarvariabel sebelum dipengaruhi oleh faktor lainnya. Model ini juga mempertimbangkan efek lag, di mana nilai variabel pada waktu sebelumnya dapat memengaruhi nilai variabel di masa sekarang.

1. Koefisien dari lag variabel ( $\beta_{iY_{t-1}}$ ) menunjukkan seberapa besar pengaruh nilai Emisi Karbon Dioksida di masa lalu terhadap nilai emisi pada periode saat ini. Jika koefisiennya tinggi, berarti emisi karbon di masa lalu memiliki dampak yang kuat terhadap emisi saat ini.
2. Koefisien dari lag variabel ( $\delta_j$ ) menggambarkan sejauh mana variabel bebas seperti PDB, Alih Fungsi Lahan, dan Energi Terbarukan di masa lalu mempengaruhi nilai emisi karbon di masa sekarang.

3. Jumlah lag yang digunakan (p,q) menentukan berapa periode sebelumnya yang akan diperhitungkan dalam analisis. Pemilihan jumlah lag ini penting karena memengaruhi akurasi model dalam menangkap pola hubungan antarvariabel.
4. Error terms ( $\epsilon_t$ ) yang mewakili faktor-faktor lain yang tidak dimasukkan dalam model tetapi masih berpengaruh terhadap variabel dependen. Keberadaan error term ini menunjukkan bahwa dalam realitasnya, hubungan antarvariabel tidak selalu dapat dijelaskan sepenuhnya oleh model yang dibangun.

Sehingga diperoleh model ekonometrika yang valid sesuai variabel penelitian sebagai berikut

$$\Delta CO^2 = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_{1i} PDB_{t-1} + \sum_{i=2}^n \beta_{2i} AFL_{t-1} + \sum_{i=3}^n \beta_{3i} EBT_{t-1} + \theta_1 PDB_{t-1} + \theta_2 AFL_{t-2} + \theta_3 EBT_{t-1}$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Hasil Penelitian

Sajikan Sebelum menentukan model regresi ARDL yang paling sesuai, perlu dilakukan beberapa pengujian, seperti uji stasioneritas, penentuan lag optimal, uji kausalitas Granger, serta uji kointegrasi dengan pendekatan Bounds Test.

Tabel 1. Uji Stasioneritas

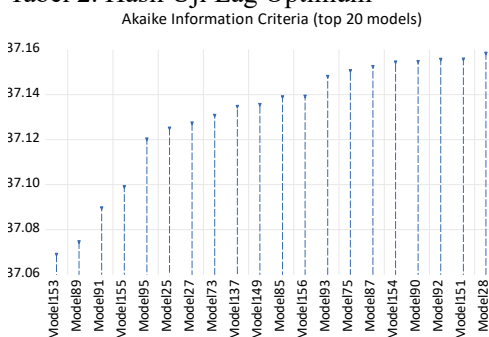
Variabel	Unit Root Test	P-value
Emisi Karbon dioksida	First Difference	0.000
PDB	First Difference	0.000
Alih Fungsi Lahan	First Difference	0.000
Energi Terbarukan	First Difference	0.000

Note : \*signifikan pada 5%

Sumber : Data diolah, 2025

Berdasarkan Tabel 1, seluruh variabel telah memenuhi kriteria stasioneritas. Dalam analisis menggunakan model ARDL, salah satu prasyarat utama yang harus dipenuhi adalah keberadaan minimal satu variabel yang mencapai stasioneritas pada tingkat first difference agar hasil estimasi dapat diperoleh secara valid. Oleh karena itu, analisis tidak dilakukan pada tingkat second difference.

Tabel 2. Hasil Uji Lag Optimum



Sumber : Data diolah, 2025

Hasil uji lag optimum menggunakan pendekatan Akaike Information Criterion (AIC) menunjukkan bahwa terdapat 20 model terbaik. Dari hasil tersebut, model 153 ARDL (1,2,1,3) dipilih sebagai model dengan lag optimum yang paling sesuai untuk analisis. Lag optimum dalam penelitian ini menunjukkan bahwa setiap variabel dalam model memiliki keterkaitan dan dapat saling memengaruhi hingga tiga periode ke depan.

Tabel 3. Hasil Kausalitas Granger

Hipotesis	F-Statistic	Prob.
PDB does not Granger Cause CO <sub>2</sub>	1.80203	0.1737
CO <sub>2</sub> does not Granger Cause PDB	2.27834	0.1052
Alih fungsi lahan does not Granger Cause CO <sub>2</sub>	0.50789	0.6806
CO <sub>2</sub> does not Granger Cause Alih fungsi lahan	0.62871	0.6036
Energi Terbarukan does not Granger Cause CO <sub>2</sub>	0.31989	0.8109
CO <sub>2</sub> does not Granger Cause Energi Terbarukan	0.18557	0.9052
Alih Fungsi lahan does not Granger Cause PDB	0.97394	0.4213
PDB does not Granger Cause Alih Fungsi Lahan	0.78428	0.5144
ETB does not Granger Cause PDB	4.62334	0.0109
PDB does not Granger Cause ETB	1.45847	0.2508
ETB does not Granger Cause LAND	0.92572	0.4434
LAND does not Granger Cause ETB	0.07086	0.9750

Note : \*signifikan pada 5%

Sumber : Data diolah, 2025

Berdasarkan hasil uji kausalitas Granger, tidak ditemukan hubungan kausal yang signifikan antara Produk Domestik Bruto (PDB) dan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), sebagaimana ditunjukkan oleh nilai F-statistic sebesar 1.80203 dengan p-value 0.1737 untuk pengaruh PDB terhadap CO<sub>2</sub>, serta F-statistic 2.27834 dengan p-value 0.1052 untuk pengaruh CO<sub>2</sub> terhadap PDB. Hal ini mengindikasikan bahwa dalam model ini, perubahan PDB tidak secara langsung memengaruhi emisi CO<sub>2</sub>, begitu pula sebaliknya. Selain itu, hubungan antara alih fungsi lahan dan emisi CO<sub>2</sub> juga tidak menunjukkan adanya hubungan sebab akibat yang signifikan. Nilai F-statistic 0.50789 dengan p-value 0.6806 menunjukkan bahwa alih fungsi lahan tidak memengaruhi emisi CO<sub>2</sub>, dan sebaliknya, nilai F-statistic 0.62871 dengan p-value 0.6036 menunjukkan bahwa emisi CO<sub>2</sub> juga tidak berpengaruh terhadap alih fungsi lahan. Demikian pula, hasil uji kausalitas antara energi terbarukan dan emisi CO<sub>2</sub> menunjukkan bahwa kedua variabel tidak memiliki hubungan yang saling memengaruhi. Hal ini terlihat dari nilai F-statistic 0.31989 dengan p-value 0.8109 untuk pengaruh energi terbarukan terhadap emisi CO<sub>2</sub>, serta F-statistic 0.18557 dengan p-value 0.9052 untuk pengaruh emisi CO<sub>2</sub> terhadap energi terbarukan.

Namun, terdapat hubungan kausal yang signifikan antara energi terbarukan dan PDB, di mana energi terbarukan terbukti memengaruhi PDB dengan F-statistic 4.62334 dan p-value 0.0109, yang berada di bawah tingkat signifikansi 5 persen. Hal ini menunjukkan bahwa perkembangan energi terbarukan memiliki dampak terhadap pertumbuhan ekonomi. Sementara itu, hubungan sebaliknya, yaitu pengaruh PDB terhadap energi terbarukan, tidak signifikan dengan F-statistic 1.45847 dan p-value 0.2508. Terakhir, tidak ditemukan hubungan kausal antara alih fungsi lahan dan energi terbarukan, sebagaimana ditunjukkan oleh F-statistic 0.92572 dengan p-value 0.4434 untuk pengaruh energi terbarukan terhadap alih fungsi lahan, serta F-statistic 0.07086 dengan p-value 0.9750 untuk pengaruh alih fungsi lahan terhadap energi terbarukan. Hal ini menunjukkan bahwa dalam model ini, perubahan dalam alih fungsi lahan dan pengembangan energi terbarukan tidak saling memengaruhi secara langsung.

Tabel 4. Hasil Uji Kointegrasi Bound test

Statistic	Value	Sign	I(0)	I(1)
F-statistic	3.626211	10%	2.37	3.2
		5%	2.79	3.67
		2.5%	3.15	4.08
		1%	3.65	4.66

Note : F-statistic > I(0)

Sumber : Data diolah, 2025

Berdasarkan Tabel 4, hasil uji kointegrasi menggunakan pendekatan Bounds Test menunjukkan bahwa nilai F-statistik sebesar 3,626211, yang melampaui nilai batas bawah (I(0)) pada berbagai tingkat signifikansi, mulai dari 10% hingga 2,5%. Jika signifikansi berada pada tingkat 1%, maka terdapat kointegrasi jangka panjang. Temuan ini menunjukkan bahwa variabel dalam model memiliki hubungan

kointegrasi, yang mencerminkan adanya keseimbangan antara hubungan jangka pendek dan jangka panjang dalam penelitian ini. Adapun penelitian ini menggunakan tingkat signifikansi sebesar 5%.

Tabel 5 Hasil Estimasi ARDL Jangka Pendek

Variabel	Koefisien	Std.Error	t-statistic	Prob
D(CO <sub>2</sub> (-1))	1.0133	0.03834	26.4296	0.000
D(PDB)	-0.0739	0.03479	-2.1255	0.046
D(PDB(-1))	0.0100	0.03507	0.2879	0.776
D(PDB(-2))	0.1379	0.03383	4.0777	0.000
D(AFL)	-54.5149	29.4416	-1.8516	0.079
D(AFL(-1))	62.8431	29.3309	2.1425	0.045
D(ETB)	-0.4102	0.24610	-1.6669	0.111
D(ETB(-1))	0.0511	0.38311	0.1334	0.895
D(ETB(-2))	0.5490	0.36102	1.5207	0.144
D(ETB(-3))	0.4927	0.27883	1.7672	0.093
C	-18099	1.01E+08	-0.1797	0.859

Note : Signifikan pada 5%

Sumber : Data Diolah, 2025

Berdasarkan pengujian jangka pendek, didapat persamaan ARDL jangka pendek sebagai berikut

$$\text{Emisi CO}_2 = -18099071 + -0.073965\text{PDB} + -54.51496\text{AFL} + -0.410245\text{EBT}$$

Berdasarkan persamaan yang ada, dalam periode pendek, variabel emisi karbon dioksida menunjukkan penurunan tetap sebesar 18099. Apabila Produk Domestik Bruto (PDB) mengalami kenaikan sebesar 1 rupiah, maka emisi karbon dioksida akan berkurang sebesar 0.0739. Di sisi lain, perubahan alih fungsi lahan memberikan kontribusi terhadap penurunan emisi karbon dioksida sebesar 54.5149. Selain itu, jika penggunaan energi terbarukan bertambah 1%, maka emisi karbon dioksida akan turun sebesar 0.4102.

Tabel 6. Hasil Estimasi ARDL jangka panjang

Variabel	Koefisien	Std.Error	t-statistic	Prob
D(PDB)	4.4708	7.3583	0.6075	0.548
D(AFL)	1690.60	3412.477	0.4954	0.624
D(ETB)	38.6095	69.7998	0.5531	0.584
C	-6.08E+09	1.27E+10	-0.4775	0.636

Note : \*Signifikan pada 5%

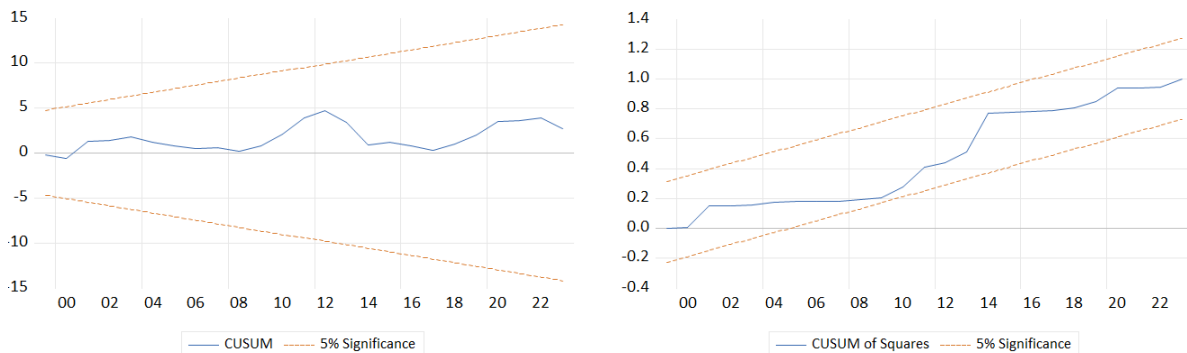
Sumber : Data Diolah, 2025

Berdasarkan pengujian jangka panjang, didapat persamaan ARDL jangka panjang sebagai berikut

$$\text{EC} = \text{D}(\text{CO}_2) - (4.4708 * \text{D}(\text{PDB})) + 1690.6048 * \text{D}(\text{AFL}) + 38.6095 * \text{D}(\text{ETB}) - 6076309874.0094$$

Berdasarkan hasil regresi ARDL jangka panjang yang diperoleh, variabel perubahan Produk Domestik Bruto (D(PDB)) memiliki koefisien sebesar 4.470832, yang menunjukkan bahwa setiap peningkatan 1 unit dalam PDB akan menyebabkan peningkatan variabel dependen sebesar 4.470832. Meskipun demikian, nilai probabilitas (0.5487) lebih besar dari 0.05, yang menunjukkan bahwa perubahan PDB tidak signifikan secara statistik. Untuk variabel perubahan alih fungsi lahan (D(LAND)), koefisiennya sebesar 7.358334 menunjukkan bahwa peningkatan alih fungsi lahan akan meningkatkan variabel dependen sebesar 7.358334. Namun, dengan probabilitas sebesar 0.6245, variabel ini juga tidak signifikan pada tingkat signifikansi 5%. Adapun perubahan penggunaan energi terbarukan (D(ETB)) memiliki koefisien 0.607588, yang berarti setiap peningkatan 1 unit dalam penggunaan energi terbarukan akan meningkatkan variabel dependen sebesar 0.607588. Meskipun koefisiennya positif, t-statistik yang rendah (0.553146) dan probabilitas (0.5849) menunjukkan bahwa variabel ini tidak signifikan secara statistik.

### 3.1.1. Uji Stabilitas model ARDL



Sumber : Data diolah, 2025

Gambar 3. Grafik Hasil Uji CUSUM

Hasil pengujian CUSUM dan CUSUMQ mengindikasikan bahwa variabel karbon dioksida berada dalam kondisi stabil, sehingga model yang digunakan dapat dianggap reliabel untuk dianalisis lebih lanjut.

### 3.1.2. Uji Asumsi Klasik

Tabel 7. Uji Autokorelasi

Uji Breusch-Godfrey Serial Correlation	Hasil
Prob. Chi-Square(2)	0.152

Sumber : Data diolah, 2025

Probabilitas chi-square merupakan indikator dalam analisis autokorelasi. Dengan nilai sebesar 0.152 yang melampaui tingkat signifikansi 0,05, dapat disimpulkan bahwa model ini tidak mengalami autokorelasi, sehingga tidak memerlukan koreksi lebih lanjut.

Tabel 8. Uji Normalitas

Uji Normalitas Jarque-Bera	Hasil
Probabilitas	0.065

Sumber : Data diolah, 2025

Berdasarkan tabel diatas, hasil uji normalitas menunjukkan nilai probabilitas sebesar 0,065, yang lebih besar dari tingkat signifikansi 0,05. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa distribusi residual dalam model ini bersifat normal.

Tabel 8. Uji heteroskedasitas

Uji Breusch-Godfrey Heteroskedasitas	Hasil
Prob. Chi-Square(2)	0.632

Sumber : Data diolah, 2025

Berdasarkan tabel di atas, hasil uji menunjukkan nilai sebesar 0,632, yang lebih tinggi dari tingkat signifikansi 0,05. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa model dalam penelitian ini tidak mengalami permasalahan heteroskedastisitas, sehingga varians residual bersifat homogen.

Tabel 9. Uji Multikolinearitas

Variance Inflation Factors	Hasil
Produk Domestik Bruto	1.753952
Alih Fungsi Lahan	1.451518

---

Energi Terbarukan 1.258072

---

Sumber : Data diolah, 2025

Berdasarkan hasil perhitungan Variance Inflation Factors (VIF) yang tercantum dalam tabel di atas, seluruh variabel memiliki nilai VIF di bawah 10, yang mengindikasikan tidak adanya masalah multikolinearitas dalam model. Secara spesifik, variabel Produk Domestik Bruto (PDB) memiliki nilai VIF sebesar 1,753, diikuti oleh variabel alih fungsi lahan dengan nilai 1,451, serta variabel energi terbarukan yang menunjukkan nilai sebesar 1,258. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terdapat hubungan linear yang kuat antarvariabel independen dalam analisis ini, sehingga model regresi dapat diinterpretasikan secara lebih akurat.

### 3.2. Pembahasan

#### 3.2.1. Hubungan Antar Variabel PDB terhadap Emisi Karbondioksida (CO<sub>2</sub>)

Dalam penelitian ini, ditemukan bahwa PDB memiliki pengaruh signifikan terhadap emisi karbon dioksida dalam jangka pendek. Penemuan ini konsisten dengan penelitian Magazzino (2016) yang juga menunjukkan adanya hubungan antara pertumbuhan PDB dan penurunan emisi karbon dioksida. Penurunan emisi karbon dioksida seiring dengan peningkatan PDB dalam jangka pendek bisa dijelaskan melalui beberapa faktor. Pertama, kemajuan teknologi dan inovasi yang biasanya terjadi dalam perekonomian yang berkembang dapat meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil yang berpolusi. Kedua, adanya penerapan kebijakan lingkungan yang lebih ketat seiring dengan pertumbuhan ekonomi, seperti pengenalan energi terbarukan, transportasi ramah lingkungan, dan peraturan yang membatasi emisi industri. Selain itu, perubahan pola konsumsi yang lebih berkelanjutan dan peningkatan kesadaran masyarakat tentang isu lingkungan juga berperan dalam mengurangi emisi karbon meski ekonomi terus berkembang.

Namun, hasil regresi jangka panjang ditemukan bahwa PDB meningkat, emisi karbon dioksida cenderung mengalami peningkatan. Hal ini dapat dijelaskan melalui beberapa alasan utama. Pertama, dalam fase perkembangan ekonomi yang lebih lanjut, konsumsi energi biasanya meningkat seiring dengan peningkatan aktivitas industri, transportasi, dan kebutuhan konsumsi masyarakat (Sackitey, 2023). Jika sumber energi yang digunakan masih bergantung pada bahan bakar fosil, maka emisi karbon dioksida akan terus meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi. Kedua, meskipun ada upaya untuk beralih ke teknologi yang lebih ramah lingkungan, dalam praktiknya transisi tersebut sering kali memerlukan waktu yang cukup lama dan investasi besar, terutama di negara-negara berkembang yang sedang mengejar pertumbuhan ekonomi (Lähteenoja et al., 2022). Selama masa transisi ini, ketergantungan pada energi konvensional tetap dominan, yang menyebabkan tingginya tingkat emisi karbon. Selain itu, peningkatan produksi dan konsumsi dalam jangka panjang cenderung menghasilkan peningkatan limbah dan polusi, terutama jika tidak ada kebijakan pengelolaan lingkungan yang efektif. Pembangunan infrastruktur yang cepat dan urbanisasi juga sering kali melibatkan penggunaan energi yang tinggi dan peningkatan aktivitas yang berpotensi menghasilkan emisi (Abdi et al., 2024)

#### 3.2.2. Hubungan antar variabel Alih Fungsi Lahan terhadap Emisi Karbondioksida (CO<sub>2</sub>)

Penelitian ini mengungkapkan bahwa alih fungsi lahan memiliki dampak yang kompleks terhadap emisi karbon dioksida. Dalam jangka pendek, perubahan penggunaan lahan menunjukkan potensi penurunan emisi sebesar 54,5149, yang sejalan dengan temuan dalam penelitian Xu et al (2024) yang menunjukkan bahwa wilayah yang menerapkan pembangunan berbasis ekologi cenderung menghasilkan emisi yang lebih rendah. Namun, analisis jangka panjang memperlihatkan kompleksitas yang lebih besar. Meskipun koefisien alih fungsi lahan menunjukkan peningkatan sebesar 1690,605 emisi karbon dioksida, hal ini tidak signifikan secara statistik (*p*-value 0,6245). Temuan ini mencerminkan dinamika perubahan lahan yang kompleks di Indonesia, di mana lahan yang semestinya berfungsi untuk menyerap emisi malah beralih menjadi lahan yang menghasilkan emisi baru (Hani Handayani, 2019).

Peningkatan alih fungsi lahan yang berkontribusi terhadap emisi karbon dioksida juga memiliki beberapa faktor yang menjelaskan mengapa dampaknya tidak signifikan dalam jangka panjang. Salah satu

penyebabnya adalah dinamika perubahan lahan yang tidak bersifat linear. Dalam jangka panjang, lahan dapat mengalami siklus regenerasi atau degradasi, yang menyebabkan efek terhadap emisi karbon menjadi lebih kompleks dan sulit untuk diamati secara langsung dalam model ARDL. Lahan yang sebelumnya dialihfungsikan untuk kegiatan industri atau perkebunan dapat mengalami reforestasi atau rehabilitasi melalui kebijakan restorasi ekosistem, sehingga mengurangi jejak karbon yang dihasilkan (Indrajaya et al., 2022). Sebaliknya, ekspansi urbanisasi yang tidak terkendali dapat meningkatkan emisi, tetapi dengan adanya upaya mitigasi seperti penghijauan kota, efek ini bisa tertahan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, ketidaksignifikanan dalam model tidak serta-merta menunjukkan bahwa alih fungsi lahan tidak berpengaruh, melainkan mencerminkan adanya dinamika lingkungan yang lebih kompleks dan interaksi dengan faktor lain seperti kebijakan tata guna lahan dan perubahan teknologi dalam mitigasi emisi karbon.

### 3.2.3. Hubungan antar variabel Energi Terbarukan terhadap Emisi Karbondioksida (CO<sub>2</sub>)

Dalam jangka pendek, peningkatan penggunaan energi terbarukan berpotensi mengurangi emisi karbon dioksida sebesar 0,4102. Meskipun dampaknya tergolong kecil, temuan ini menunjukkan adanya kemajuan positif dalam upaya mitigasi perubahan iklim. Sementara itu, analisis jangka panjang menunjukkan koefisien positif sebesar 38,6095 untuk energi terbarukan, namun tidak signifikan secara statistik (p-value 0,5849). Hal ini mencerminkan tantangan yang dihadapi Indonesia dalam transisi energi, di mana ketergantungan yang tinggi pada bahan bakar fosil dan kebutuhan percepatan adopsi teknologi energi terbarukan menjadi faktor utama. Penelitian serupa yang dilakukan di lokasi berbeda oleh Gyamfi et al (2024) juga menyimpulkan bahwa energi terbarukan memberikan pengaruh positif terhadap pengurangan emisi dalam jangka pendek, karena penerapan teknologi ramah lingkungan mendukung penggunaan energi yang lebih efisien dan lebih bersih. mempengaruhi.

Ketidaksignifikanan hubungan antara peningkatan energi terbarukan dengan emisi karbon dioksida dapat dijelaskan oleh dominasi bahan bakar fosil dalam bauran energi Indonesia, khususnya batu bara dan minyak bumi. Meskipun pemanfaatan energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin terus berkembang, dampaknya terhadap penurunan emisi karbon masih terbatas karena belum mampu menggeser ketergantungan utama pada sumber energi konvensional.

Selain itu, sektor transportasi masih didominasi oleh kendaraan berbahan bakar minyak, sementara industri manufaktur bergantung pada listrik yang sebagian besar dihasilkan dari pembangkit berbahan bakar batu bara. Akibatnya, meskipun kapasitas energi terbarukan meningkat, kontribusi emisi karbon dari sektor-sektor utama tetap tinggi, sehingga transisi menuju sistem energi yang lebih bersih belum memberikan perubahan struktural yang signifikan dalam jangka panjang. Sebagai perbandingan, negara-negara yang telah berhasil mengurangi emisi karbon melalui energi terbarukan umumnya telah mencapai skala investasi dan penetrasi energi hijau yang jauh lebih besar (Huang, 2023). Hal ini menunjukkan bahwa dampak signifikan terhadap emisi baru dapat tercapai apabila integrasi energi terbarukan dilakukan secara masif dan didukung oleh kebijakan serta infrastruktur yang memadai.

### 3.3. *Kaitan dengan Tujuan Penelitian*

Tujuan Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keterkaitan antara pertumbuhan ekonomi, alih fungsi lahan, penggunaan energi terbarukan, dan emisi karbon dioksida di Indonesia. Dengan menerapkan pendekatan ekonometrika Autoregressive Distributed Lag (ARDL), penelitian ini berupaya mengidentifikasi hubungan jangka pendek dan jangka panjang antara variabel-variabel tersebut. Penelitian ini berangkat dari kesenjangan dalam kajian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh (Ribeiro et al., 2019) dan Spapa (Freire-González et al., 2024), yang meneliti hubungan antara Produk Domestik Bruto (PDB), luas lahan, dan emisi karbon dioksida. Namun, penelitian-penelitian tersebut lebih banyak berfokus pada negara maju dan belum mengkaji secara mendalam konteks negara berkembang. Hasil dari penelitian terdahulu menunjukkan bahwa meskipun hubungan antara PDB per kapita dan emisi CO<sub>2</sub> per kapita melemah seiring waktu, keterkaitan tersebut masih tetap positif secara global. Bahkan, hanya segelintir negara berpenghasilan tinggi yang mulai menunjukkan hubungan terbalik dalam beberapa tahun terakhir. Selain itu, penelitian sebelumnya juga mengungkapkan bahwa populasi dan kepadatan penduduk berperan dalam meningkatkan emisi karbon dioksida. Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini berupaya mengisi celah dengan mengaplikasikan kajian serupa dengan pembaharuan variabel yaitu PDB, Penggunaan alih fungsi lahan, dan memadukan

energi terbarukan sebagai variabel independen dan emisi karbon dioksida menjadi variabel dependen dalam konteks Indonesia sebagai negara berkembang. Dengan mempertimbangkan dinamika ekonomi dan lingkungan di Indonesia, penelitian ini diharapkan dapat memberikan perspektif baru mengenai interaksi antara pertumbuhan ekonomi, perubahan penggunaan lahan, energi terbarukan, dan emisi karbon dioksida dalam konteks pembangunan berkelanjutan.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis keterkaitan antara pertumbuhan ekonomi, alih fungsi lahan, penggunaan energi terbarukan, dan emisi karbon dioksida di Indonesia. Hasil estimasi menggunakan pendekatan *Autoregressive Distributed Lag* (ARDL) menunjukkan bahwa dalam jangka pendek, peningkatan Produk Domestik Bruto (PDB) berkontribusi terhadap penurunan emisi karbon dioksida. Fenomena ini dapat dikaitkan dengan kemajuan teknologi serta penerapan kebijakan lingkungan yang lebih ketat. Namun, dalam jangka panjang, pertumbuhan ekonomi justru berisiko meningkatkan emisi karbon, yang mencerminkan tantangan dalam transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan. Sementara itu, alih fungsi lahan dalam jangka pendek terlihat mampu menekan emisi karbon, namun dalam jangka panjang tidak menunjukkan dampak yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa konversi lahan yang tidak dikelola secara berkelanjutan dapat menjadi hambatan dalam upaya mitigasi perubahan iklim. Adapun penggunaan energi terbarukan memiliki peran dalam mengurangi emisi karbon dalam jangka pendek, meskipun dalam jangka panjang efeknya tidak signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa efektivitas energi terbarukan masih perlu diperkuat melalui strategi yang lebih komprehensif. Oleh karena itu, guna mencapai keberlanjutan lingkungan, diperlukan kebijakan yang mendukung pertumbuhan ekonomi berbasis hijau, pengelolaan lahan yang lebih berkelanjutan, serta percepatan transisi menuju energi bersih yang lebih efektif.

Meskipun penelitian ini telah mengkaji hubungan antara pertumbuhan ekonomi, alih fungsi lahan, energi terbarukan, dan emisi karbon dioksida di Indonesia, masih terdapat beberapa aspek yang dapat dikembangkan lebih lanjut guna memperdalam pemahaman mengenai topik ini. Studi selanjutnya dapat mempertimbangkan penerapan metode ekonometrika yang lebih kompleks, seperti *Panel Vector Autoregression* (PVAR) atau *Structural Equation Modeling* (SEM) untuk mengeksplorasi interaksi dinamis antarvariabel secara lebih mendalam. Selain itu, mengingat karakteristik ekonomi dan kondisi lingkungan di Indonesia yang bervariasi antarwilayah, penelitian berikutnya dapat mempertimbangkan pendekatan berbasis wilayah atau provinsi guna memperoleh pemahaman yang lebih kontekstual mengenai faktor-faktor yang memengaruhi emisi karbon di berbagai daerah.

#### Bibliografi

- Abdi, A. H., Sheikh, S. N., & Elmi, S. M. (2024). Pathways to sustainable development in Somalia: evaluating the impact of agriculture, renewable energy, and urbanisation on ecological footprints and CO<sub>2</sub> emissions. *International Journal of Sustainable Energy*, 43(1), 1–20. <https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2411832>
- Bergougui, B., Boudjana, R. H., Mehibel, S., & Zambrano-Monserrate, M. A. (2024). How do institutional quality and income asymmetrically affect carbon emissions inequality? A quantile-on-quantile assessment for six major global emitters. *Journal of Cleaner Production*, 483(October). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144215>
- Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf E., Becker, W., Monforti-Ferrario, F., Quadrelli, R., Riskez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Brandao De Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, E. (2023). Ghg Emissions of All World Countries. In *Publications Office of the European Union*. <https://doi.org/10.2760/235266>
- Fernández Fernández, J. A., Casquet Cano, M. Á., & Quiroga, S. (2024). “The interplay between carbon emissions and inequality: A complex networks approach.” *Environmental and Sustainability Indicators*, 24(October). <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100520>
- Freire-González, J., Padilla Rosa, E., & Raymond, J. L. (2024). World economies’ progress in decoupling from CO<sub>2</sub> emissions. *Scientific Reports*, 14(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71101-2>

- Gyamfi, B. A., Q. Agozie, D., Bekun, F. V., & Onifade, S. T. (2024). Gravitating towards emission reduction targets in the G7 and E7 economies: the financial development and sustainable energy perspectives. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 19(1). <https://doi.org/10.1080/15567249.2024.2323191>
- Hani Handayani, A. S. (2019). Jurnal Ilmiah Jurnal Ilmiah. *Jurnal Ilmiah Aset*, 7(1), 24–33.
- Huang, Z. (2023). Does green investment reduce carbon emissions? New evidence from partially linear functional-coefficient models. *Heliyon*, 9(9), e19838. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19838>
- Indrajaya, Y., Yuwati, T. W., Lestari, S., Winarno, B., Narendra, B. H., Nugroho, H. Y. S. H., Rachmanadi, D., Pratiwi, P., Turjaman, M. H., Adi, R. N., Savitri, E., Putra, P. B., Santosa, P. B., Nugroho, N. P., Cahyono, S. A., Wahyuningtyas, R. S., Prayudyarningsih, R., Halwany, W., Siarudin, M., ... Mendham, D. (2022). Tropical Forest Landscape Restoration in Indonesia: A Review. In *Land* (Vol. 11, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/land11030328>
- Kripfganz, S., & Schneider, D. C. (2023). ardl: Estimating autoregressive distributed lag and equilibrium correction models. *Stata Journal*, 23(4), 983–1019. <https://doi.org/10.1177/1536867X231212434>
- Lähteenoja, S., Hyysalo, S., Lukkarinen, J., Marttila, T., Saarikoski, H., Faehnle, M., & Peltonen, L. (2022). What does it take to study learning in transitions? A case of citizen energy in Finland. *Sustainability: Science, Practice, and Policy*, 18(1), 651–664. <https://doi.org/10.1080/15487733.2022.2109316>
- Laureate, N., Kuznets, S., American, N., Trade, F., Ekc, T., Report, W. D., Bank, W., Commission, W., & Ekc, T. (1996). *Kuznets curve. 1993*, 237–240.
- Magazzino, C. (2016). The relationship between real GDP, CO2 emissions, and energy use in the GCC countries: A time series approach. *Cogent Economics and Finance*, 4(1). <https://doi.org/10.1080/23322039.2016.1152729>
- Mikayilov, J. I., Hasanov, F. J., & Galeotti, M. (2018). Decoupling of CO2 emissions and GDP: A time-varying cointegration approach. *Ecological Indicators*, 95(August 2018), 615–628. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.051>
- Murphy, D. J. (2024). Carbon Sequestration by Tropical Trees and Crops: A Case Study of Oil Palm. *Agriculture (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/agriculture14071133>
- Ribeiro, H. V., Rybski, D., & Kropp, J. P. (2019). Effects of changing population or density on urban carbon dioxide emissions. *Nature Communications*, 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11184-y>
- Romanello, M., Di Napoli, C., Drummond, P., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., Scamman, D., Arnell, N., Ayeb-Karlsson, S., Ford, L. B., Belesova, K., Bowen, K., Cai, W., Callaghan, M., Campbell-Lendrum, D., Chambers, J., van Daalen, K. R., Dalin, C., Dasandi, N., ... Costello, A. (2022). The 2022 report of the Lancet Countdown on health and climate change: health at the mercy of fossil fuels. *The Lancet*, 400(10363), 1619–1654. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)01540-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)01540-9)
- Sackitey, G. L. (2023). Do environmental taxes affect energy consumption and energy intensity? An empirical analysis of OECD countries. *Cogent Economics and Finance*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/23322039.2022.2156094>
- Sun, W., & Liu, X. (2024). Spatio-Temporal Evolution and Multi-Scenario Prediction of Ecosystem Carbon Storage in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration Based on the FLUS-InVEST Model. *Sustainability (Switzerland)*, 16(16). <https://doi.org/10.3390/su16167025>
- Tu, Z., Feng, C., & Zhao, X. (2022). Revisiting energy efficiency and energy related CO2 emissions: Evidence from RCEP economies. *Economic Research-Ekonomska Istrazivanja*, 35(1), 5858–5878. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2022.2038651>
- UNFCCC. (2021). COP 26 Glasgow Climate Pact Advance unedited version Decision. *Cop26*, 1–8. [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop26\\_auv\\_2f\\_cover\\_decision.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop26_auv_2f_cover_decision.pdf)
- Vogel, J., & Hickel, J. (2023). Is green growth happening? An empirical analysis of achieved versus Paris-compliant CO2–GDP decoupling in high-income countries. *The Lancet Planetary Health*, 7(9), e759–e769. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00174-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00174-2)
- Xu, Z., Sun, J., Qin, Y., Xu, J., & Li, S. (2024). Does environmental pollution reduce residents' income? Evidence from CFPS in China. *Environment International*, 189(January), 108790. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108790>