



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

JEJAK KARBON DI KAWASAN SAARC: ANALISIS DARI SISI EKONOMI DAN LINGKUNGAN

Rima Herlista¹, Zulfa Emalia²

^{1,2} Universitas Lampung

¹rimaherlistas@gmail.com, ²zulfa.emalia@feb.unila.ac.id

Informasi Naskah

Update Naskah:

Dikumpulkan: 04 Desember 2025

Diterima: 22 Februari 2026

Terbit/Dicetak: 28 Februari 2026

Keywords:

carbon footprint, carbon emission, renewable energy consumption, agriculture land, industri 4.0

Abstract

Carbon footprint, whose main component is carbon emissions, is the main cause of environmental degradation that has a widespread impact on the survival of communities. The increase in carbon emissions in developing countries is triggered by high population growth, increased demand for energy such as fossil fuels, and increased economic activity in the industrial and manufacturing sectors that are not environmentally friendly. The significant increase in carbon emissions in developing countries, particularly in low-middle income countries in the SAARC region, shows that this region has not been able to balance economic growth and environmental preservation. This is in line with the Environmental Kuznets Curve (EKC) theory, which states that economic activities will initially tend to produce pollution. Therefore, this study aims to analyze the relationship between carbon footprint, renewable energy consumption, agricultural land, and industri 4.0 in low-middle income countries in the SAARC region during the period 1992-2021. This study uses the FMOLS regression method to examine the effect of independent variables on dependent variables in the long term. The results show that renewable energy consumption has negative and significant on carbon emissions in the long term. Industri 4.0 have a positive and significant effect on carbon emissions in the long term. Meanwhile, agricultural land has a negative and insignificant effect on carbon emissions in the long term. Thus, SAARC governments need to encourage the transition to renewable energy and implement sustainable industrial development policies.

A. PENDAHULUAN

Dalam jangka panjang perubahan iklim telah menjadi isu penting yang menimbulkan ancaman serius terhadap kehidupan di bumi (Tsimisaraka et al., 2023). Salah satu indikator utama yang mendorong terjadinya perubahan iklim adalah pemanasan global (Wahyudi et al., 2024). IPCC merilis data bahwa dalam dua dekade pertama abad-21, suhu permukaan global meningkat sebesar 0.99 °C. Pemanasan global yang terjadi ini ditandai semakin meningkatnya emisi gas rumah kaca (GRK) yang diukur oleh jejak karbon. Emisi karbon sebagai komponen utama penyusun jejak karbon perlu dikurangi atau bahkan mencapai *net zero emission* guna menekan terjadinya pemanasan global yang kian memburuk (Calvin et al., 2023).

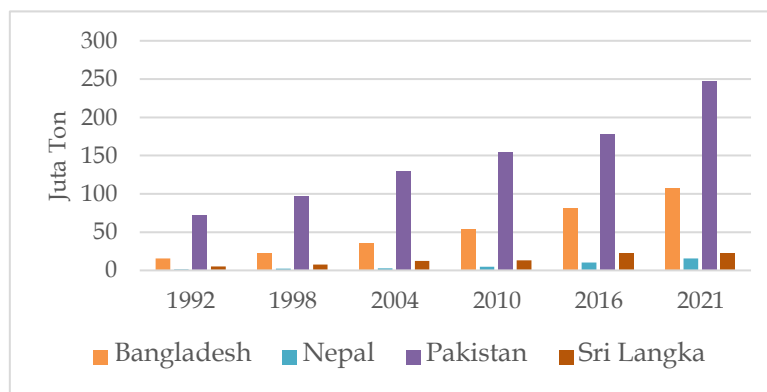
Menyadari pentingnya penanganan emisi karbon, negara-negara di dunia tergabung dalam *Paris Agreement* yang memiliki tujuan agar negara-negara di dunia berkontribusi dalam penurunan emisi paling

* Corresponding Author.

Rima Herlista, author, e-mail : rimaherlista@gmail.com

maksimal 1,5 derajat celsius (Mukhtarov et al., 2023). Namun, faktanya menunjukkan bahwa emisi karbon secara global terus menunjukkan tren yang meningkat, terutama di Asia (*Global Carbon Budget*). Emisi karbon di Asia dipicu oleh jumlah penduduk yang tinggi serta peningkatan kegiatan ekonomi pada sektor industri dan manufaktur yang semakin memperburuk kondisi lingkungan. Negara-negara di Asia terutama di Kawasan Asia Selatan yang tergabung dalam kerja sama regional SAARC (*South Asian Association for Regional Cooperation*) yang mayoritas merupakan negara berkembang turut serta dalam meningkatkan pertumbuhan ekonomi negaranya. Hal ini ditandai oleh semakin meningkatnya sektor industri dan manufaktur sebagai pendorong perekonomian negara. *SDG Progress Report* di Asia -Pasifik yang dirilis oleh *Economic and Social Commission for Asia and the Pacific* menyebutkan bahwa Asia Selatan mengalami peningkatan pada tujuan SDGs nomor 9 yaitu inovasi, industri, dan infrastruktur. Namun, mayoritas negara-negara di Kawasan SAARC masih belum mampu mengadopsi penggunaan energi yang rendah karbon (Bank Dunia, 2024). Sementara itu, dalam laporan ESCAP 2021, Asia Selatan menjadi kawasan yang mengalami kemunduran atau regresi pada tujuan SDGs nomor 13 yaitu aksi iklim, bila dibandingkan kawasan-kawasan lain di Asia. Hal ini menandakan bahwa kawasan ini belum mampu menyeimbangkan antara pertumbuhan ekonomi dan pelestarian lingkungan.

Negara-negara berpenghasilan menengah kebawah atau yang termasuk ke dalam kategori *low-middle income* di Kawasan SAARC seperti Bangladesh, Nepal, Pakistan, dan Sri Lanka merupakan beberapa negara yang masih menerapkan kebijakan dalam upaya peningkatan perekonomian yang disertai dengan tingginya emisi karbon. Negara-negara *low-middle income* ini memiliki intensitas gas rumah kaca terhadap PDB 3,5 kali lebih tinggi bila dibandingkan dengan negara-negara *high income* (Bank Dunia, 2024). Oleh karena itu, negara-negara dengan kategori ini berpotensi sebagai penyumbang emisi karbon yang tinggi bila dibandingkan dengan negara-negara *high income*. Sejuah ini, negara-negara berkembang masih belum melakukan upaya maksimal dalam mengurangi emisi karbon, hal ini ditandai semakin meningkatnya emisi karbon di negara-negara *low-middle income* Kawasan SAARC. Berikut ini adalah data terkait emisi karbon di negara-negara *low-middle income* Kawasan SAARC pada periode Tahun 1992-2021.



Sumber: Global Carbon Budget (data diolah 2025)

Gambar 1 Emisi Karbon Dioksida Negara-Negara *Low-middle income* di Kawasan SAARC pada Periode Tahun 1992-2021 (Juta ton)

Berdasarkan Gambar 1, emisi karbon menunjukkan tren yang meningkat sepanjang periode Tahun 1992-2021. Pakistan mencatat peningkatan yang signifikan yaitu sebesar 247.9 juta ton pada Tahun 2021. Selain itu, Bangladesh menunjukkan peningkatan dari 15.39 juta ton pada Tahun 1992 menjadi 107.63 juta ton pada Tahun 2021. Peningkatan emisi karbon yang signifikan di negara-negara seperti Pakistan dan Bangladesh mencerminkan bahwa pertumbuhan ekonomi sangat berkaitan dengan kerusakan lingkungan. Sejalan dengan teori Environmental Kuznet Curve (EKC) bahwa pada tahap awal pembangunan ekonomi, proses industrialisasi sering kali disertai dengan peningkatan konsumsi energi

tidak terbarukan seperti bahan bakar fosil, yang mendorong semakin meningkatnya emisi karbon (Santana & Maria, 2024).

Di negara-negara berkembang, seperti negara-negara *low-middle income* di SAARC, pertumbuhan populasi, urbanisasi, dan industrialisasi yang terjadi memicu meningkatnya permintaan energi (Gunarto et al., 2024). Sejak abad 19, emisi karbon yang berasal dari bahan bakar fosil secara konstan terus meningkat seiring dengan penggunaan mesin-mesin akibat timbulnya revolusi industri (Raza & Hasan, 2022). Penggunaan energi secara tidak efektif dan berlebihan di berbagai sektor, seperti rumah tangga, transportasi, dan industri akan semakin memperburuk kondisi lingkungan (Shaari et al., 2020). Sehingga, perlu adanya transisi penggunaan energi terbarukan untuk menggantikan energi fosil sebagai upaya melindungi lingkungan dan mencapai tujuan pembangunan yang berkelanjutan (J. L. Liu et al., 2020). Sejalan dengan penelitian oleh Sun et al., (2023) yang membuktikan bahwa konsumsi energi terbarukan berpengaruh negatif terhadap emisi karbon di Asia Selatan.

Selain faktor ekonomi seperti konsumsi energi terbarukan, studi ini melakukan pendekatan non-ekonomi yaitu dari sisi lingkungan. Salah satu faktor lingkungan yang berkontribusi terhadap emisi karbon adalah sektor pertanian. Negara-negara berkembang di Asia Selatan seperti negara-negara *low-middle income* di Kawasan ini cenderung mengandalkan sektor pertanian dalam menopang perekonomian negaranya (Kapçak & İşleyen, 2024). Disamping sebagai sektor penting sebagai penyedia pasokan pangan, lahan pertanian memproduksi sekitar 20% emisi karbon secara global (Lu et al., 2018). Penelitian oleh Tanveer et al., (2024) membuktikan bahwa lahan pertanian berpengaruh positif dan signifikan dalam jangka pendek dan jangka panjang di Pakistan. Hal ini diakibatkan karena sektor pertanian di negara berkembang cenderung masih menggunakan metode pertanian konvensional yang dalam proses produksi serta pengoperasian mesin masih menggunakan sumber energi tidak ramah lingkungan & İşleyen, 2024; Raza et al., 2023). Namun, pendapat lain menyatakan bahwa produktivitas pertanian dapat mengurangi emisi karbon dalam jangka panjang (Raihan & Tuspekova, 2022). Artinya, sektor pertanian juga dapat berpotensi dalam mengurangi emisi jika proses pertanian dilakukan dengan memanfaatkan sumber energi ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Seiring berbagai tantangan dari sisi ekonomi dan sisi lingkungan yang dihadapi negara-negara *low-middle income* di Kawasan SAARC, kemunculan industri 4.0 dapat menjadi solusi potensial dalam menekan laju peningkatan emisi karbon. Teknologi industri 4.0 ini memungkinkan sektor manufaktur khususnya manufaktur dengan teknologi tinggi dan menengah dapat meningkatkan output lebih cepat (Javaid et al., 2022) seiring dengan peningkatan efisiensi konsumsi energi tak terbarukan, yang pada akhirnya dapat mengurangi emisi karbon dari sektor manufaktur. Penelitian oleh (He et al., 2024) menunjukkan bahwa industri 4.0 berkontribusi secara signifikan terhadap penurunan emisi karbon. Selain itu, penelitian oleh Bai et al., (2020) dan Yurtay, (2025) membuktikan bahwa teknologi industri 4.0 secara signifikan dapat mengurangi emisi karbon dalam proses manufaktur. Sehingga, inovasi baru di sektor manufaktur berteknologi menengah dan tinggi diharapkan dapat memitigasi emisi karbon yang dihasilkan dari setiap aktivitas ekonomi, termasuk sektor industri dan pertanian. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk melihat bagaimana hubungan antara jejak karbon yang diukur dalam emisi karbon, konsumsi energi terbarukan, lahan pertanian, dan industri 4.0 di 4 negara yaitu Bangladesh, Nepal, Pakistan, dan Sri Lanka yang merupakan negara dengan kategori *low-middle income* di Kawasan SAARC pada periode tahun 1992-2021.

B. TINJAUAN PUSTAKA

1. Teori Environmental Kuznet Curve (EKC)

Teori EKC merupakan teori yang menggambarkan hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan. Menurut hipotesis teori ini, hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan mengikuti pola berbentuk kurva-U yang terbalik (Fodha & Zaghdoud, 2010). Teori EKC ini dikembangkan oleh Grossman & Krueger (1991) yang dibagi atas tiga tahap yaitu *pre-industrial*

economics, industrial economic, dan post-industrial economics. Pada tahap awal pembangunan, sebuah negara akan melakukan eksploitasi sumber daya guna mendorong pertumbuhan ekonomi (tahap *pre-industrial economics*). Setelah itu, negara tersebut akan mencapai titik puncak dalam EKC atau tahap *industrial economics*. Pada titik ini, negara menyadari pentingnya kualitas lingkungan, sehingga struktur ekonomi mulai mengalami pergeseran dari bidang industri ke bidang jasa sebagai upaya menciptakan perekonomian yang berkelanjutan (tahap *post-industrial economics*).

2. Teori Schumpeter

Teori pertumbuhan dengan konsep *creative destruction* ini di perkenalkan oleh Joseph A Schumpeter yang berpendapat bahwa pertumbuhan ekonomi suatu negara didorong oleh inovasi di bidang teknologi, seperti memperkenalkan teknologi atau produk baru yang dilakukan oleh wirausahawan (Bank Dunia, 2024). Konsep *creative destructive* dalam teori ini meliputi proses inovasi yang menggantikan struktur ekonomi lama yang kurang efisien dengan struktur ekonomi baru guna menghasilkan produktivitas dan pertumbuhan ekonomi yang semakin baik.

3. Teori Sustainable Development (Pembangunan Berkelanjutan)

Konsep pembangunan berkelanjutan ini berfokus pada bagaimana pertumbuhan ekonomi dan kelestarian lingkungan dapat berjalan seimbang, upaya ini dilakukan sebagai respon atas berbagai dampak degradasi lingkungan yang diakibatkan oleh kegiatan manusia. Studi ini menekankan pada tujuan SDGs nomor 13 yaitu penanganan perubahan iklim. Sebab, fenomena perubahan iklim yang didorong oleh peningkatan gas rumah kaca ini menjadi isu penting yang menimbulkan dampak signifikan bagi kehidupan masyarakat. Beberapa ahli mengungkapkan bahwa peningkatan pertumbuhan ekonomi akan meningkatkan degradasi lingkungan (Rahayu et al., 2024).

4. Jejak Karbon (*Carbon Footprint*)

Jejak karbon berfokus pada sebuah proses atau kegiatan yang berkaitan dengan emisi karbon. Jejak karbon merupakan sejumlah emisi gas rumah kaca, yang biasanya dinyatakan dalam ekuivalen karbon dioksida, yang dilepaskan ke atmosfer baik secara langsung maupun tidak langsung melalui proses produksi atau aktivitas manusia yang berkaitan dengan perubahan iklim (Yurtay, 2025). Studi ini menggunakan emisi karbon sebagai proksi dari jejak karbon karena emisi karbon merupakan komponen utama penyusun jejak karbon yang dihasilkan oleh aktivitas manusia.

5. Sumber Energi Terbarukan

Energi merupakan bagian dari sumber daya alam sebagai salah satu kebutuhan penting dalam kehidupan manusia. Sektor energi memiliki kontribusi yang besar dalam perekonomian sebab hampir seluruh kegiatan manusia memerlukan energi (Mathur et al., 2022). Namun, pemanfaatan energi yang secara berlebihan terutama energi fosil dapat menjadi penyebab utama terjadinya perubahan iklim secara global (Adrian, 2023; Shaari et al., 2020). Oleh karena itu, perlu adanya transisi dari penggunaan energi tidak terbarukan ke energi terbarukan seperti biomassa, panas bumi, angin, atau air pasang laut.

6. Lahan Pertanian

Lahan pertanian didefinisikan sebagai semua bentuk lahan yang digunakan untuk kegiatan produksi pertanian. Sektor pertanian merupakan bagian dari aktivitas manusia yang menyebabkan hilangnya lahan hutan (Pacheco et al., 2021) sehingga mengurangi daya serap hutan terhadap karbon (Global Forest Watch, 2024). Selain itu, kegiatan pertanian konvensional yang masih menggunakan energi tak terbarukan sangat berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbon. Oleh karena itu, adopsi pertanian yang berkelanjutan menjadi salah satu upaya dalam memitigasi perubahan iklim

7. Industri 4.0

Industri 4.0 merupakan sebuah perkembangan dalam industri yang ditandai proses produksi yang lebih efisien dengan menggunakan teknologi baru (Balsalobre-Lorente et al., 2023). Sebuah konsep baru industri 4.0 ini pertama kali diperkenalkan di Jerman selama acara *Hannover Fair* pada Tahun 2011 sebagai

lambang awal dari revolusi industri ke-4 (Lucato et al., 2019). Penggunaan teknologi industri 4.0 ini berpotensi dapat mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon yang berasal dari sektor manufaktur (Bai et al., 2020). Studi ini menggunakan data proporsi nilai tambah manufaktur dengan teknologi menengah-tinggi sebagai proksi dari industri 4.0 karena indikator ini mencerminkan kemampuan adopsi teknologi digital dalam proses produksi.

8. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Sun et al., (2023) membuktikan bahwa konsumsi energi terbarukan dan inovasi teknologi memiliki hubungan negatif terhadap jejak karbon dalam jangka panjang di negara-negara Kawasan Asia Selatan. Artinya, peralihan menuju energi terbarukan dan adopsi penggunaan teknologi industri 4.0 berpotensi mengurangi jejak karbon dalam jangka panjang di negara-negara Asia Selatan. Selain itu, penelitian oleh Raihan et al., (2024) menunjukkan bahwa pertanian memiliki hubungan positif terhadap emisi karbon dalam jangka panjang, sementara itu, konsumsi energi terbarukan memiliki dampak negatif terhadap emisi karbon di India. Selanjutnya, penelitian oleh Raihan & Tuspekova, (2022) membuktikan bahwa konsumsi energi terbarukan dan produktivitas pertanian dapat mengurangi emisi karbon di Turki.

9. Hipotesis

- H1: Diduga terdapat hubungan jangka panjang antara konsumsi energi terbarukan, lahan pertanian, dan industri 4.0 terhadap jejak karbon di negara-negara *low-middle income* Kawasan SAARC
- H2: Konsumsi energi terbarukan diduga berpengaruh negatif dan signifikan terhadap jejak karbon
- H3: Lahan pertanian diduga berpengaruh positif dan signifikan terhadap jejak karbon
- H4: Industri 4.0 diduga berpengaruh negatif dan signifikan terhadap jejak karbon

C. METODE PENELITIAN

Studi ini menggunakan pendekatan kuantitatif yang berdasarkan data-data sekunder. Data-data yang digunakan berasal dari *Global Carbon Budget* dan *World Development Indicator*. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah panel yang mencakup 4 negara dengan kategori *low-middle income* di Kawasan SAARC pada periode Tahun 1992-2021.

Definisi Operasional Variabel

1. Jejak karbon: Jejak karbon di proksikan oleh emisi karbon dioksida diukur dalam juta ton.
2. Konsumsi energi terbarukan: Konsumsi energi dari semua sumber terbarukan seperti angin, surya, hidro, biogas, biofuel cair, biofuel padat, surya, dan panas bumi, diukur dari proporsi konsumsi energi terbarukan terhadap total konsumsi energi
3. Lahan pertanian: Lahan pertanian mencakup area yang di klasifikasikan oleh FAO sebagai lahan yang digunakan untuk tanaman sementara, padang rumput sementara, dan lahan yang ditujukan untuk kebun dapur, diukur dari proporsi lahan pertanian terhadap total lahan
4. Industri 4.0: Industri 4.0 diproksikan oleh proporsi nilai tambah manufaktur teknologi menengah dan tinggi terhadap total nilai tambah sektor manufaktur

Penggunaan data panel dalam studi ini karena dapat mengidentifikasi dan mengestimasi efek yang tidak dapat terdeteksi jika hanya menggunakan data time-series atau cross-section (Baltagi, 1996). Studi ini menggunakan regresi panel kointegrasi untuk meneliti bagaimana hubungan variabel independen dan variabel dependen dalam jangka panjang.

1. Uji Stasioneritas

Langkah pertama dalam estimasi panel ini adalah uji stasioneritas untuk melihat apakah semua variabel terintegrasi dalam order yang sama. Dalam uji stasioneritas, uji *unit root* digunakan untuk menentukan tingkat integrasi masing-masing variabel penelitian apakah stasioner di ordo $I(0)$, $I(1)$ atau stasioner pada ordo $I(2)$ dengan *null hypothesis* yaitu terdapat *unit root* (Leiwakabessy & Payapo, 2022). Panel

uji *unit root* ini dilakukan agar tidak ada hasil regresi yang semu (*spurious regression*) saat menggunakan data panel (Zwane et al., 2023).

2. Uji kointegrasi

Setelah uji stasioneritas, selanjutnya dilakukan uji kointegrasi dengan menggunakan *Kao Based* (1999). Pada data panel, uji Kao memiliki dua tipe pengujian yaitu tipe Dickey-Fuller (DF) dan Augmented Dickey-Fuller (ADF) (Baltagi, 2005). Uji kointegrasi dilakukan untuk melihat apakah setiap variabel yang akan diteliti terdapat hubungan jangka panjang atau tidak terutama ketika variabel tersebut non-stasioner pada ordo $I(0)$ tetapi stasioner pada ordo $I(1)$ dengan null hypothesis yaitu terdapat kointegrasi atau terdapat hubungan jangka panjang (Liwakabessy & Payapo, 2022).

3. Metode Regresi Panel FMOLS

Metode panel Fully Modified Ordinary Least Square (FMOLS) ini adalah metode regresi yang dirancang untuk data panel yang bersifat non-stasioner (semua variabel harus stasioner pada ordo $I(1)$) dan memiliki kointegrasi antar variabel (Pattak et al., 2023). Metode FMOLS dikembangkan untuk mengatasi kelemahan dari regresi OLS biasa terutama dalam menghadapi masalah autokorelasi dan endogenitas variabel (Kao & Chiang, 1999). Metode FMOLS bertujuan untuk menghasilkan estimasi regresi yang konsisten dan tidak bias asimtotik, serta menghasilkan distribusi normal bebas *error term* (Pedroni, 1999). Bentuk persamaan untuk model panel FMOLS yang disertakan dalam studi ini memodifikasi model yang digunakan oleh Hardi et al., (2023) yaitu sebagai berikut:

$$\text{LOGCF}_{it} = \alpha + \beta_1 \text{REC}_{it} + \beta_2 \text{AL}_{it} + \beta_3 \text{IDS}_{it} + \epsilon_{it}$$

Berdasarkan persamaan diatas, diketahui bahwa α adalah konstanta, β adalah koefisien regresi, *log carbon footprint* (LOGCF) adalah logaritma jejak karbon (juta ton), *renewable energy consumption* (REC) adalah konsumsi energi terbarukan (persen dari total konsumsi energi), *agriculture land* (AL) adalah lahan pertanian (persen dari PDB), *industry 4.0* (IDS) adalah industri 4.0 (persen dari total nilai tambah sektor manufaktur), i adalah jumlah observasi (4 negara *low-middle income*), t adalah banyaknya periode waktu (30 tahun mulai dari Tahun 1992-2021), dan ϵ_{it} adalah *error term*.

Melalui metode FMOLS dapat diperoleh estimasi hubungan jangka panjang antara variabel independen dan variabel dependen, serta pengaruh masing-masing variabel independen secara parsial melalui nilai probabilitas dari koefisien regresi. Uji pengaruh parsial (uji t) ini digunakan untuk menguji apakah nilai koefisien variabel independen secara individu memiliki pengaruh signifikan atau tidak terhadap variabel dependen (Mubarak, 2021).

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengolahan Data

1. Uji Stasioneritas

Berdasarkan Tabel 1, hasil pengujian *unit root* menunjukkan bahwa variabel emisi karbon (LOGCF), konsumsi energi terbarukan (REC), lahan pertanian (AL), dan industri 4.0 (IDS) tidak stasioner pada level atau ordo $I(0)$, tetapi menjadi stasioner pada tingkat *first difference* atau ordo $I(1)$ hal ini terlihat dari nilai probabilitas yang kurang dari 0.05 ($\leq 0,05$).

2. Uji Kointegrasi

Berdasarkan Tabel 2, hasil uji kointegrasi Kao menunjukkan nilai probabilitas ADF signifikan pada $\alpha = 5\%$. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa antara konsumsi energi terbarukan (REC), lahan pertanian (AL), dan industri 4.0 (IDS) terdapat hubungan jangka panjang terhadap emisi karbon (LOGCF).

3. Regresi Panel FMOLS

Berdasarkan Tabel 3, model persamaan dalam penelitian ini adalah:

$$\text{LOGCF}_{\text{t}} = -0.068514 \text{REC}_{\text{t}} - 0.010760 \text{AL}_{\text{t}} + 0.041773 \text{IDS}_{\text{t}} + \epsilon_{\text{t}}$$

Variabel konsumsi energi terbarukan (REC) berpengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi karbon dengan nilai koefisien -0.0685 dan nilai signifikansi (prob) $0.0000 < 0.05$. Hal ini menunjukkan bahwa konsumsi energi terbarukan berkontribusi dalam menurunkan emisi karbon. Selanjutnya, variabel lahan pertanian berpengaruh negatif dan tidak signifikan terhadap emisi karbon. Sementara itu, variabel proporsi nilai tambah manufaktur berteknologi menengah dan tinggi (IDS) memiliki hubungan positif dan signifikan terhadap emisi karbon dengan koefisien 0.0418 dan nilai signifikansi (prob) $0.0010 < 0.05$. Hal ini menandakan bahwa proporsi nilai tambah manufaktur berteknologi menengah dan tinggi

Tabel 1 Hasil Uji Stasioneritas

Metode Uji Akar	Intercept dan Trend		Metode Uji	Intercept dan Trend	
Unit Panel	Level	1 st different	Akar Unit Panel		
LOGCF			AL		
LLC	0.2185	0.0000*	LLC	0.7847	0.1250
IPS	0.2297	0.0000*	IPS	0.9404	0.0011*
ADF-Fisher	0.1729	0.0003*	ADF-Fisher	0.7426	0.0004*
PP-Fisher	0.0093	0.0000*	PP-Fisher	0.5556	0.0000*
REC			IDS		
LLC	0.0307*	0.0000*	LLC	0.2376	0.0000*
IPS	0.1952	0.0001*	IPS	0.1862	0.0000*
ADF-Fisher	0.0726	0.0004*	ADF-Fisher	0.2361	0.0000*
PP-Fisher	0.5060	0.0000*	PP-Fisher	0.2227	0.0000*

Sumber: Diolah penulis (2025)

Tabel 2 Hasil Uji Kointegrasi

Uji Kointegrasi Kao Residual (LOGCF sebagai variabel dependen)		
Indikator	t-statistik	Probabilitas
ADF	-2.119948	0.0170*

Keterangan : * signifikan 5%

Sumber: Diolah penulis (2025)

Tabel 3 Hasil Regresi FMOLS

Variabel	Koefisien	Signifikansi 5%
REC	-0.068514	Signifikan
IDS	0.041773	Signifikan
AL	-0.010760	Tidak signifikan

Sumber: Diolah penulis (2025)

Pembahasan Hasil Penelitian

1. Hubungan Konsumsi Energi Terbarukan dan Emisi Karbon

Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap kenaikan konsumsi energi terbarukan sebesar 1% maka emisi karbon mengalami penurunan sebesar 0.0752% (*ceteris paribus*) dalam jangka panjang di negara-negara *low-middle income* di Kawasan SAARC. Temuan ini memperkuat pernyataan bahwa transisi menuju penggunaan energi terbarukan merupakan salah satu upaya yang efektif dalam mengurangi emisi karbon di negara-negara berkembang (Voumik, Mimi, et al., 2023), khususnya di SAARC. Sejalan dengan beberapa penelitian yang dilakukan sebetulnya, seperti penelitian oleh Sun et al., (2023) di Asia Selatan, Kapçak & İşleyen, (2024) di Turki, Raihan & Tuspekova, (2022a) di Kazakhstan, dan Esquivias et al., (2022) di 8 negara Asia yang membuktikan bahwa konsumsi energi terbarukan memiliki hubungan negatif dengan emisi karbon

Negara-negara di Kawasan SAARC mengalami tantangan dalam upaya percepatan peralihan ke penggunaan energi yang bebas karbon (Voumik et al., 2023). Akibatnya, sebagian negara-negara di SAARC seperti Bangladesh dan Pakistan masih mengandalkan energi fosil sebagai sumber utama dalam sistem pembangkit listrik. Pemerintah Bangladesh telah berupaya menurunkan konsumsi energi fosil dengan menetapkan target pemanfaatan energi terbarukan sebesar 10% pada Tahun 2021 namun, realisasi

pencapaiannya hanya sekitar 3% (Rahman et al., 2023). Oleh karena itu, perlu dilakukannya pengembangan dan pemanfaatan energi terbarukan dalam jangka panjang yang berkontribusi secara signifikan terhadap penurunan emisi karbon guna keberlangsungan lingkungan (Che et al., 2023; Voumik et al., 2023).

2. Hubungan Lahan Pertanian dan Emisi Karbon

Hasil penelitian menunjukkan bahwa emisi karbon memiliki hubungan yang negatif namun tidak signifikan di Kawasan SAARC. Temuan ini bertentangan dengan hipotesis awal yang mengansumsikan bahwa lahan pertanian dapat meningkatkan emisi karbon. Hal ini dikarenakan sektor pertanian bukan hanya dapat meningkatkan emisi karbon namun sektor pertanian dapat menyerap karbon di vegetasi dan tanah, sehingga meingkatnya lahan pertanian akan meningkatkan jumlah emisi yang dapat terserap (White, 2022). Sejalan dengan penelitian oleh X. Liu et al., (2017) di Kawasan ASEAN menunjukkan bahwa peningkatan energi terbarukan dan sektor pertanian dapat menurunkan emisi karbon. Selain itu, penelitian oleh Naseem & Guang Ji (2021) membuktikan bahwa sektor pertanian menunjukkan hubungan negatif terhadap emisi karbon di negara-negara SAARC.

Temuan dalam studi ini mengindikasikan bahwa lahan pertanian berpotensi dapat mengurangi emisi karbon di negara-negara *low-middle income* Kawasan SAARC dalam jangka panjang. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh Afroz et al., (2025) yang menunjukkan bahwa adopsi agroforestri terhadap tanaman panjang di lahan pertanian terbukti dapat mengurangi emisi gas rumah kaca di Bangladesh. Oleh karena itu, sektor pertanian di Kawasan SAARC dapat berkontribusi menurunkan emisi karon sebesar 20% pada Tahun 2050 ketika menerapkan langkah-langkah seperti adopsi pertanian yang berkelanjutan, penggunaan energi ramah lingkungan, dan meningkatkan perawatan tanaman (Raihan, Tanchangya, et al., 2024).

3. Hubungan Industri 4.0 dengan Emisi Karbon

Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap kenaikan proporsi nilai tambah manufaktur berteknologi tinggi dan menengah sebesar 1% maka emisi karbon mengalami peningkatan sebesar 0.0418% (*ceteris paribus*) dalam jangka panjang di negara-negara *low-middle income* Kawasan SAARC. Temuan ini tidak sesuai dengan hipotesis awal yang menyatakan bahwa inovasi pada sektor manufaktur dapat mengurangi emisi. Hal ini menandakan bahwa manufaktur berteknologi menengah dan tinggi berpotensi meningkatkan emisi karbon yang menyebabkan terjadinya degradasi lingkungan. Sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya seperti penelitian oleh Khan et al., (2024) yang membuktikan bahwa industri berteknologi menengah dan tinggi memiliki dampak positif dan signifikan terhadap degradasi lingkungan di negara-negara APEC selama periode 1996-2020. Selain itu, penelitian oleh He et al., (2024) menunjukkan bahwa manufaktur berteknologi menengah dan tinggi dalam aktivitas industri memiliki pengaruh yang signifikan terhadap lingkungan di Asia Selatan.

Di negara-negara *low-middle income* Kawasan SAARC, adaptasi teknologi 4.0 mendorong semakin pesatnya perkembangan sektor ekonomi digital, seperti perkembangan *e-commerce*. Perkembangan digitalisasi di Kawasan SAARC sangat berpotensi menghasilkan emisi karena masih menggunakan sumber energi tidak ramah lingkungan (Murshed, 2020). Perkembangan *e-commerce* selain memberikan kemudahan bagi konsumen juga dapat meningkatkan permintaan konsumsi yang mendorong sektor manufaktur untuk meningkatkan kapasitas produksinya. Dengan demikian, secara tidak langsung *e-commerce* dapat meningkatkan emisi melalui proses produksi maupun logistik (UNCTAD, 2024). Oleh karena itu, perlu adanya kebijakan yang mendorong pembangunan industri yang berkelanjutan di Kawasan SAARC.

E. SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan mengenai pengaruh konsumsi energi terbarukan, lahan pertanian, dan industri 4.0 terhadap emisi karbon, maka dapat disimpulkan yaitu

1. Variabel konsumsi energi terbarukan, lahan pertanian, dan industri 4.0 memiliki kointegrasi atau hubungan jangka panjang terhadap emisi karbon.
2. Konsumsi energi terbarukan berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi karbon dalam jangka panjang. Hal ini menandakan bahwa peralihan menuju energi terbarukan berkontribusi secara signifikan terhadap penurunan emisi di negara-negara low-middle Kawasan SAARC.
3. Lahan pertanian berpengaruh negatif namun tidak signifikan terhadap emisi karbon dalam jangka panjang. Hal ini menandakan bahwa lahan pertanian bukan determinan utama emisi karbon tetapi memiliki potensi untuk menurunkan emisi karbon di negara-negara *low-middle income* Kawasan SAARC.
4. Industri 4.0 berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi karbon dalam jangka panjang. Hal ini menandakan bahwa adopsi teknologi 4.0 pada sektor manufaktur berteknologi menengah dan tinggi berkontribusi secara signifikan dalam meningkatkan emisi karbon di negara-negara *low-middle income* Kawasan SAARC.

Saran

Setelah melakukan penelitian ini, peneliti memberikan saran sebagai berikut:

1. Pemerintah di negara-negara *low-middle income* Kawasan SAARC perlu melakukan pengembangan dalam sektor energi terbarukan seperti mengalihkan investasi menuju energi terbarukan dan memperluas infrastruktur energi hijau guna mengurangi ketergantungan terhadap energi tidak ramah lingkungan.
2. Pemerintah di negara-negara *low-middle income* Kawasan SAARC diharapkan dapat menerapkan kebijakan pembangunan industri yang berkelanjutan seperti penerapan teknologi yang efisien dan penggunaan energi terbarukan dalam proses produksi pada sektor industri dan manufaktur agar proses industrialisasi modern tidak menghasilkan emisi karbon yang berlebihan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adrian, M. A. (2023). Analisis Pengaruh Aktivitas Ekonomi terhadap Peningkatan Emisi Karbon: Studi Empiris Empat Negara ASEAN. *Jurnal Ekonomi Indonesia* •, 12, 187–202.
- Afroz, M. S., Ashraf, S. M. K., Rana, M. T., Ripta, S. K., Asha, S. B. R., Urmi, S. M. S. T., Hyakumura, K., & Islam, K. K. (2025). Agroforestry: A Sustainable Land-Use Practice for Enhancing Productivity and Carbon Sequestration in Madhupur Sal Forest, Bangladesh. *Sustainability (Switzerland)*, 17(8). <https://doi.org/10.3390/su17083697>
- Astutiningsih, S. E., & Sari, C. M. (2017). Pemberdayaan Kelompok Agroindustri Dalam Upaya Mempercepat Pertumbuhan Ekonomi Jawa Timur. *Jurnal Ilmu Ekonomi Terapan*, 2(1). <https://doi.org/10.20473/jiet.v2i1.5500>
- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 Technologies Assessment: A Sustainability Perspective. *International Journal of Production Economics*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>
- Balsobre-Lorente, D., Contente dos Santos Parente, C., Leitão, N. C., & Cantos-Cantos, J. M. (2023). The Influence of Economic Complexity Processes and Renewable Energy on CO2 Emissions of BRICS. What About Industry 4.0? *Resources Policy*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103547>
- Baltagi, B. H. (1996). *Panel Data Methods*.
- Baltagi, B. H. (2005). *Econometric Analysis of Panel Data* (3rd ed). Wiley.
- Bank Dunia. (2024). *Laporan Pembangunan Dunia 2024: Perangkap Pendapatan Menengah* (Buku Tinjauan Umum). Lisensi: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.

- Baroleh, S. E., Massie, C. D., & Lengkong, N. L. (2023). *Implementasi Konvensi Internasional Paris Agreement tentang Mitigasi Perubahan Iklim di Indonesia*. XI(5).
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barret, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S. L., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Ha, M. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... Y. Park, Eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- Che, C., Li, S., Yin, Q., Li, Q., Geng, X., & Zheng, H. (2023). Does Income Inequality Have a Heterogeneous Effect on Carbon Emissions Between Developed and Developing Countries? Evidence from Simultaneous Quantile Regression. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1271457>
- Esquivias, M. A., Sugiharti, L., Rohmawati, H., Rojas, O., & Sethi, N. (2022). Nexus between Technological Innovation, Renewable Energy, and Human Capital on the Environmental Sustainability in Emerging Asian Economies: A Panel Quantile Regression Approach. *Energies*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/en15072451>
- Fodha, M., & Zaghdoud, O. (2010). Economic Growth and Pollutant Emissions in Tunisia: An Empirical Analysis of The Environmental Kuznets Curve. *Energy Policy*, 38(2), 1150–1156. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.11.002>
- Global Forest Watch. (2024). *Country Tree Cover Loss in Mha*. <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/global/?lang=en>
- Gunarto, T., Ciptawaty, U., Yuliawan, D., Mahyudin, A., Pratama, A. D., & Wahyudi, H. (2024). Comparison of Energy Consumption to Economic Growth in Developing Asian and Developed Asian Countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 14(1), 264–271. <https://doi.org/10.32479/ijeep.14871>
- Hardi, I., Idroes, G. M., Zulham, T., Suriani, S., & Saputra, J. (2023). Economic Growth, Agriculture, Capital Formation and Greenhouse Gas Emissions in Indonesia: FMOLS, DOLS and CCR Applications. *Ekonomikalia Journal of Economics*, 1(2), 82–91. <https://doi.org/10.60084/eje.v1i2.109>
- He, Z., Li, J., & Ayub, B. (2024). How Do Income Inequality, Poverty and Industry 4.0 Affect Environmental Pollution in South Asia: New Insights from Quantile Regression. *Heliyon*, 10(13). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33397>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., & Gonzalez, E. S. (2022). Understanding the Adoption of Industry 4.0 Technologies in Improving Environmental Sustainability. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 203–217. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.01.008>
- Kao, C., & Chiang, M.-H. (1999). *On the Estimation and Inference of a Cointegrated Regression in Panel Data* (2). <http://ssrn.com/abstract=1807931><https://ssrn.com/abstract=1807931>
- Kapçak, S., & İşleyen, S. (2024). The Relationship Between Renewable Energy, Agriculture And Carbon Emissions: The Case of Turkey. *Border Crossing*, 14(1), 59–72. <https://doi.org/10.33182/bc.v14i1.2855>
- Khan, M. W. A., Panigrahi, S. K., Almuniri, K. S. N., Soomro, M. I., Mirjat, N. H., & Alqaydi, E. S. (2019). Investigating the Dynamic Impact of CO2 Emissions and Economic Growth on Renewable Energy Production: Evidence from FMOLS and DOLS Tests. *Processes*, 7(8), 1–19. <https://doi.org/10.3390/pr7080496>
- Khan, Q. R., Anwar, A., Muhammad, T., Ghafoori, N., & Ahmad, M. (2024). Asymmetric Effects of High-Tech Industry and Presence of Pollution-Haven Hypothesis in APEC Countries: Fresh Evidence with Panel Quantile Regression. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26(8), 2643–2660. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02703-z>
- Leiwakabessy, E., & Payapo, R. W. (2022). The Dynamic Link of Energy Consumption, Economic Growth and Poverty in Eastern Indonesia: Panel VECM and FMOLS Approach. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(2), 83–90. <https://doi.org/10.32479/ijeep.12626>
- Liu, J. L., Ma, C. Q., Ren, Y. S., & Zhao, X. W. (2020). Do Real Output and Renewable Energy Consumption Affect CO2 Emissions? Evidence for Selected BRICS Countries. *Energies*, 13(960).

<https://doi.org/10.3390/en13040960>

- Liu, X., Zhang, S., & Bae, J. (2017). The Impact of Renewable Energy and Agriculture on Carbon Dioxide Emissions: Investigating The Environmental Kuznets Curve in Four Selected ASEAN Countries. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1239–1247. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.086>
- Lu, X., Kuang, B., Li, J., Han, J., & Zhang, Z. (2018). Dynamic Evolution of Regional Discrepancies in Carbon Emissions from Agricultural Land Utilization: Evidence from Chinese Provincial Data. *Sustainability (Switzerland)*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/su10020552>
- Lucato, W. C., Pacchini, A. P. T., Facchini, F., & Mummolo, G. (2019). Model to Evaluate the Industry 4.0 Readiness Degree in Industrial Companies. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1808–1813. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.464>
- Mathur, S., Waswani, H., Singh, D., & Ranjan, R. (2022). Alternative Fuels for Agriculture Sustainability: Carbon Footprint and Economic Feasibility. *AgriEngineering*, 4(4), 993–1015. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4040063>
- Mubarak, R. (2021). *Pengantar Ekonometrika Edisi Pertama* (F. Firmansyah & F. Nuryana, Eds.). Duta Media Publishing.
- Mukhtarov, S., Aliyev, F., Aliyev, J., & Ajayi, R. (2023). Renewable Energy Consumption and Carbon Emissions: Evidence from an Oil-Rich Economy. *Sustainability (Switzerland)*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/su15010134>
- Murshed, M. (2020). An Empirical Analysis of The Non-Linear Impacts of ICT-Trade Openness on Renewable Energy Transition, Energy Efficiency, Clean Cooking Fuel Access and Environmental Sustainability in South Asia. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09497-3/Published>
- Naseem, S., & Guang Ji, T. (2021). A System-GMM Approach to Examine The Renewable Energy Consumption, Agriculture and Economic Growth's Impact on CO2 Emission in The SAARC Region. *GeoJournal*, 86(5), 2021–2033. <https://doi.org/10.1007/s10708-019-10136-9>
- Pacheco, P., Mo, K., Dudley, N., Shapiro, A., Aquilar-Amuchastegui, N., Ling, P. Y., Anderson, C., & Marx, A. (2021). *Deforestation Front: Drivers and Responses in A Changing World*.
- Pattak, D. C., Tahrim, F., Salehi, M., Voumik, L. C., Akter, S., Ridwan, M., Sadowska, B., & Zimon, G. (2023). The Driving Factors of Italy's CO2 Emissions Based on the STIRPAT Model: ARDL, FMOLS, DOLS, and CCR Approaches. *Energies*, 16(5845). <https://doi.org/10.3390/en16155845>
- Pedroni, P. (1999). *Fully Modified OLS for Heterogeneous Cointegrated Panels*.
- Rahayu, R. P., Thine, E. Y., & Aini, F. A. N. (2024). Transisi Ekonomi Hijau: Analisis Faktor Penyebab Meningkatnya Emisi CO2 Guna Menyongsong Ekonomi Berkelanjutan di Indonesia. *Inspire Journal: Economics and Development Analysis*, 4(2), 1–18. <https://ejournal.uksw.edu/inspire>
- Rahman, M. H., Voumik, L. C., Akter, S., & Radulescu, M. (2023). New Insights from Selected South Asian Countries on The Determinants of GHG Emissions. *Energy and Environment*, 36(2), 958–978. <https://doi.org/10.1177/0958305X231189180>
- Raihan, A., Tanchangya, T., Rahman, J., & Ridwan, M. (2024). The Influence of Agriculture, Renewable Energy, International Trade, and Economic Growth on India's Environmental Sustainability. *Journal of Environmental and Energy Economics*, 3(1), 37–53. <https://doi.org/10.56946/jeee.v3i1.324>
- Raihan, A., & Tuspekova, A. (2022). Dynamic Impacts of Economic Growth, Energy Use, Urbanization, Agricultural Productivity, and Forested Area on Carbon Emissions: New Insights from Kazakhstan. *World Development Sustainability*, 1. <https://doi.org/10.1016/j.wds.2022.100019>
- Raza, M. Y., & Hasan, M. M. (2022). Estimating The Multiple Impacts of Technical Progress on Bangladesh's Manufacturing and Industrial Sector's CO2 Emissions: A Quantile Regression Approach. *Energy Reports*, 8, 2288–2301. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.005>
- Raza, M. Y., Zhongpan, Q., & Pengju, W. (2023). Agriculture-Related Energy Consumption, Food Policy, and CO2 Emission Reduction: New Insights from Pakistan. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1099813>
- Santana, F. R., & Maria, N. S. B. (2024). Determinan Emisi CO2 pada Negara Anggota ASEAN Tahun 2015–2022. *Diponegoro Journal of Economics*, 13(2), 53–68. <https://doi.org/10.14710/djoe.44589>
- Shaari, M. S., Karim, Z. A., & Abidin, N. Z. (2020). The Effects of Energy Consumption and National Output on CO2 Emissions: New Evidence from OIC Countries Using a Panel ARDL Analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/SU12083312>

- Ślusarczyk, B. (2018). Industry 4.0 – Are We Ready? *Polish Journal of Management Studies*, 17(1), 232–248. <https://doi.org/10.17512/pjms.2018.17.1.19>
- Sun, Y., Al-Tal, R. M., Siddik, A. B., Khan, S., Murshed, M., & Alvarado, R. (2023). The Non-Linearity Between Financial Development and Carbon Footprints: The Environmental Roles of Technological Innovation, Renewable Energy, and Foreign Direct Investment. *Economic Research-Ekonomika Istrazivanja*, 36(2). <https://doi.org/10.1080/1331677X.2023.2174153>
- Suparmoko, M. (2013). *Ekonomi Sumber Daya Alam dan Lingkungan (Suatu Pendekatan Teoritis)* (Edisi 4 Revisi). BPFPE.
- Tanveer, A., Song, H., Faheem, M., & Daud, A. (2024). Caring For The Environment. How Do Deforestation, Agricultural Land, and Urbanization Degrade The Environment? Fresh Insight Through the ARDL Approach. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04368-6>
- Tsimisaraka, R. S. M., Xiang, L., Andrianarivo, A. R. N. A., Josoa, E. Z., Khan, N., Hanif, M. S., Khurshid, A., & Limongi, R. (2023). Impact of Financial Inclusion, Globalization, Renewable Energy, ICT, and Economic Growth on CO2 Emission in OBOR Countries. *Sustainability (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/su15086534>
- UNCTAD. (2024). *Digital Economy Report 2024: Chapter V: E-Commerce and Environmental Sustainability*.
- Voumik, L. C., Mimi, M. B., & Raihan, A. (2023). Nexus Between Urbanization, Industrialization, Natural Resources Rent, and Anthropogenic Carbon Emissions in South Asia: CS-ARDL Approach. *Anthropocene Science*, 2(1), 48–61. <https://doi.org/10.1007/s44177-023-00047-3>
- Wahyudi, H., Gunarto, T., Ciptawaty, U., Aida, N., Yunita, R., & Putri, R. M. (2024). The Influence of Determinants on CO2 Emission in Indonesia for a Decade. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 14(1), 61–65. <https://doi.org/10.32479/ijEEP.15132>
- White, R. (2022). The Role of Agriculture in the Australian Government's Emission Reduction Fund. *Advances in Environmental and Engineering Research*, 03(04), 1–9. <https://doi.org/10.21926/aeer.2204039>
- Yurtay, Y. (2025). Carbon Footprint Management with Industry 4.0 Technologies and Erp Systems in Sustainable Manufacturing. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/app15010480>
- Zwane, T. T., Udimal, T. B., & Pakmoni, L. (2023). Examining the Drivers of Agricultural Carbon Emissions in Africa: an Application of FMOLS and DOLS Approaches. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(19), 56542–56557. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25173-8>