

**EMISI KARBON DI KAWASAN ASEAN DAN SAARC: ANALISIS DARI
SISI EKONOMI DAN SISI LINGKUNGAN**

(Skripsi)

Oleh

RIMA HERLISTA

NPM 2111021052



FAKULTAS EKONOMI DAN BISNIS

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2026

ABSTRAK

EMISI KARBON DI KAWASAN ASEAN DAN SAARC: ANALISIS DARI SISI EKONOMI DAN SISI LINGKUNGAN

OLEH

RIMA HERLISTA

Peningkatan emisi CO₂ yang signifikan di negara-negara berkembang, khususnya di negara-negara *low-middle income* Kawasan ASEAN dan SAARC menunjukkan bahwa kawasan ini belum mampu menyeimbangkan antara pertumbuhan ekonomi dan pelestarian lingkungan. Hal ini sejalan dengan Teori Environmental Kuznets Curve (EKC) yang menyatakan bahwa kegiatan ekonomi pada awalnya akan cenderung menghasilkan polusi namun pada titik tertentu kerusakan lingkungan akan berkurang seiring dengan meningkatnya kesadaran masyarakat akan kelestarian lingkungan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara jejak karbon, konsumsi energi terbarukan, investasi asing langsung, lahan pertanian, dan industri 4.0 di negara-negara *low-middle income* Kawasan ASEAN dan SAARC pada periode Tahun 1992-2021. Penelitian ini menggunakan metode regresi FMOLS untuk melihat pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen dalam jangka panjang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsumsi energi terbarukan berpengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi CO₂ dalam jangka panjang di ASEAN. Investasi asing langsung berpengaruh positif tidak signifikan dan lahan pertanian berpengaruh negatif tidak signifikan terhadap emisi CO₂ dalam jangka panjang di ASEAN. Sementara itu hasil penelitian juga menunjukkan bahwa konsumsi energi terbarukan dan industri 4.0 berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂ dalam jangka panjang di SAARC. Sedangkan, lahan pertanian berpengaruh negatif dan tidak signifikan terhadap emisi CO₂ dalam jangka panjang di SAARC. Dengan demikian, pemerintah Kawasan ASEAN dan SAARC perlu mendorong peralihan menuju penggunaan energi terbarukan dan mengimplementasikan kebijakan pembangunan industri yang berkelanjutan.

Kata kunci: Emisi CO₂, Jejak Karbon Konsumsi Energi Terbarukan, Investasi Asing Langsung, Lahan Pertanian, Industri 4.0, *Low-Middle Income*

ABSTRACT

THE CARBON EMISSIONS IN THE ASEAN AND SAARC REGIONS: AN ANALYSIS FROM AN ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL PERSPECTIVE

BY

RIMA HERLISTA

Significant increases in carbon emissions in developing countries, particularly in low-middle income countries in the ASEAN and SAARC regions, indicate that these regions have not been able to strike a balance between economic growth and environmental conservation. This is in line with the Environmental Kuznets Curve (EKC) theory, which states that economic activity will initially tend to produce pollution, but at a certain point, environmental damage will decrease as public awareness of environmental sustainability increases. Therefore, this study aims to analyze the relationship between carbon footprint, renewable energy consumption, direct investment, agricultural land, and industry 4.0 in low-middle income countries in the ASEAN and SAARC regions during the period 1992-2021. This study uses the FMOLS regression method to examine the long-term effect of independent variables on dependent variables. The results show that renewable energy consumption has a negative and significant effect on long-term carbon emissions in ASEAN. Foreign direct investment has a positive but insignificant effect, and agricultural land has a negative but insignificant effect on long-term carbon emissions in ASEAN. Meanwhile, the results also show that renewable energy consumption and Industry 4.0 have a positive and significant effect on carbon emissions in the long term in SAARC. Meanwhile, agricultural land has a negative and insignificant effect on carbon emissions in the long term in SAARC. Thus, the governments of the ASEAN and SAARC regions need to encourage the transition to renewable energy and implement sustainable industrial development policies.

Keywords: *Carbon Emission, Carbon Footprint, Renewable Energy Consumption, Foreign Direct Investment, Agriculture Land, Industry 4.0, Low-Middle Income*

**EMISI KARBON DI KAWASAN ASEAN DAN SAARC: ANALISIS DARI
SISI EKONOMI DAN SISI LINGKUNGAN**

Oleh

RIMA HERLISTA

Skripsi

Sebagai Salah Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA EKONOMI

Pada

Jurusan Ekonomi Pembangunan

Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Lampung



FAKULTAS EKONOMI DAN BISNIS

UNIVERSITAS LAMPUNG

2026

Judul Skripsi : **EMISI KARBON DI KAWASAN ASEAN DAN
SAARC: ANALISIS DARI SISI EKONOMI
DAN SISI LINGKUNGAN**

Nama Mahasiswa : **Rima Herfista**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2111021052**

Program Studi : **Ekonomi Pembangunan**

Fakultas : **Ekonomi dan Bisnis**



Zulfa Emalia, S.E., M.Sc
NIP 198505102010122004

MENGETAHUI

2. Ketua Jurusan Ekonomi Pembangunan

Dr. Arivina Ratih Y.T. S.E., M.M
NIP 198007052006042002

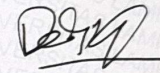
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

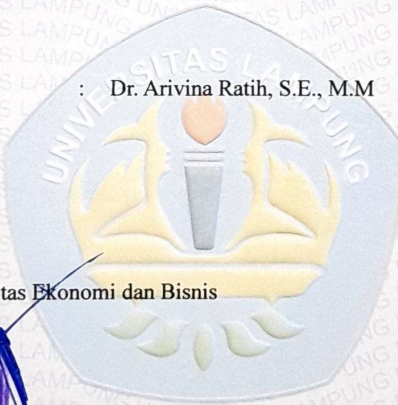
Ketua : Zulfa Emalia, S.E., M.Sc



Penguji I : Dr. Dedy Yuliawan, S.E., M.Si



Penguji II : Dr. Arivina Ratih, S.E., M.M



2. Dekan Fakultas Ekonomi dan Bisnis



Prof. Dr. Nanroby, S.E., M.Si
NIP. 196606211990031003

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 27 Januari 2026

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Rima Herlista

NPM : 2111021052

Konsentrasi : Ekonomi Sumber Daya Alam dan Lingkungan

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Emisi Karbon di Kawasan ASEAN dan SAARC: Analisis Dari Sisi Ekonomi dan Sisi Lingkungan” merupakan hasil karya asli yang saya susun dengan penuh tanggung jawab dan bukan merupakan plagiasi dari karya orang lain. Jika di kemudian hari terbukti pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Bandar Lampung, 27 Januari 2026

Yang Membuat Pernyataan



Rima Herlista

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Rima Herlista, lahir di Bandar Lampung, pada tanggal 05 November 2002. Penulis merupakan anak kedua dari empat bersaudara, sebagai putri dari pasangan Bapak Rubandi dan Ibu Muhar Lisa Sari.

Pendidikan formal penulis dimulai dari TK Aisyiyah Bustnul Athfal dan lulus pada Tahun 2009. Selanjutnya melanjutkan pendidikan di SD Negeri 2 Pelita dan lulus pada Tahun 2015. Pendidikan menengah pertama ditempuh di SMP Negeri 7 Bandar Lampung dan lulus pada Tahun 2018, kemudian melanjutkan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 9 Bandar Lampung dan lulus pada Tahun 2021.

Pada Tahun 2021, penulis diterima sebagai mahasiswi Program Studi Ekonomi Pembangunan, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam organisasi kemahasiswaan sebagai staf PSDA Kopma Unila 2022-2023 dan sebagai anggota Pilar FEB Unila 2022-2023.

Pada Tahun 2024, penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung Periode I di Desa Kaliawi, Kecamatan Negeri Besar, Kabupaten Way Kanan selama 40 hari.

MOTTO

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan”

-QS. Al-Insyirah: 6

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

-QS. Al-Baqarah: 286

“Semua orang punya waktunya masing-masing untuk berhasil”

-Reply 1988

“Apa yang sudah menjadi milikmu tidak akan pernah tertukar. Semua hal baik akan datang tepat pada waktunya dan Allah adalah sebaik-baiknya pemberi”

-Rima Herlista

PERSEMBAHAN



Alhamdulillah rabbil 'alamin dengan penuh rasa syukur Kepada Allah SWT atas segala rahmat, kekuatan, hidayah, dan petunjuk-Nya yang selalu menemani setiap langkah penulis hingga skripsi ini dapat terselesaikan. Dengan penuh ketulusan, karya sederhana ini penulis persembahkan kepada Mama Lisa. Terima kasih atas pengorbanan, doa, dukungan, kesabaran, kekuatan dan kasih sayang yang tiada henti diberikan, sehingga penulis mampu bertahan dan melangkah hingga titik ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Ayah Rubandi atas kerja keras, pengorbanan, dan kasih sayang yang sampai saat ini masih bisa dirasakan oleh penulis. Terima kasih sebesar-besarnya kepada kedua orang tua penulis yang telah memberikan kesempatan dan kepercayaan kepada penulis untuk bisa menempuh pendidikan hingga saat ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada kakak dan adik tersayang Randi Supriadi, Dwi Lystika Yuni, dan Aresha Aqilla Khairina yang selalu memberikan semangat dan kebahagiaan dalam setiap langkah perjuangan penulis. Kepada seluruh keluarga besar, penulis mengucapkan terima kasih atas doa dan dukungan yang selalu menyertai. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada seluruh dosen dan civitas akademika Jurusan Ekonomi Pembangunan, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Lampung atas segala kesempatan, ilmu, dan bimbingan yang diberikan selama masa studi penulis. Terakhir, persembahan ini penulis tujukan kepada diri sendiri yang telah bertahan dan terus melangkah di tengah tantangan dan rintangan yang tidak mudah. Semoga karya sederhana ini menjadi awal dari perjalanan penulis yang ke depannya dapat memberikan manfaat bagi banyak orang.

SANWACANA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “*Emisi Karbon di Kawasan ASEAN dan SAARC: Analisis Dari Sisi Ekonomi dan Sisi Lingkungan*” sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar Sarjana Ekonomi pada Program Studi Ekonomi Pembangunan, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Lampung. Melalui proses pembelajaran yang telah dilalui, penulis menyadari bahwa pengetahuan yang dimiliki masih terbatas. Dalam penyusunan skripsi, penulis banyak memperoleh bantuan, bimbingan, saran dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis dengan tulus mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Nairobi, S.E., M.Si., selaku Dekan Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Lampung.
2. Ibu Dr. Arivina Ratih Yulihar Taher, S.E., M.M., selaku Ketua Jurusan Ekonomi Pembangunan Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Lampung.
3. Ibu Zulfa Emalia, S.E., M.Sc., selaku Sekretaris Jurusan Ekonomi Pembangunan Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Lampung serta selaku dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, dan motivasi yang diberikan dengan penuh kesabaran hingga skripsi ini dapat terselesaikan. Terima kasih penulis ucapkan atas dukungan luar biasa yang diberikan sehingga penulis bisa bangkit dan tetap semangat untuk menyelesaikan skripsi ini.
4. Bapak Dr. Dedy Yuliawan, S.E., M.Si dan Ibu Emi Maimunah, S.E., M.Si., selaku dosen penguji, atas pengarahan, kritik, saran, dan dukungan yang diberikan dalam membantu penulis menyelesaikan skripsi ini dengan lebih baik.

5. Seluruh staf dan dosen pengajar di Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Lampung yang telah berbagi ilmu dan wawasan berharga selama masa perkuliahan.
6. Untuk kedua orang tua tercinta, Lisa dan Rubandi. Terima kasih Mama & Ayah atas doa, cinta, dan dukungan yang tiada henti selalu diberikan kepada penulis. Terima kasih sudah menjadi orang tua penulis, terima kasih sudah memberikan kesempatan yang berharga agar penulis dapat lahir dan melangkah sejauh ini. Meskipun kita tidak bisa kembali menjadi keluarga yang utuh, tetapi penulis bahagia dan bangga bisa menjadi anak kalian. Jalan yang ditempuh keluarga kita memang tidak mudah, tetapi terima kasih untuk terus hadir dalam setiap langkah dan perjuangan penulis. Terima kasih atas hari-hari bahagia yang kalian usahakan sehingga penulis terus dapat berharap bahwa dunia penulis masih dan akan terus bahagia. Terima kasih atas pelajaran berharga yang kalian berikan, penulis tetap bertahan dan menjadi perempuan yang lebih kuat dari sebelumnya. Skripsi sederhana ini penulis persembahkan atas kerja keras dan perjuangan yang kalian lakukan untuk penulis. Semoga kehidupan kita ke depannya akan terus bahagia dan bermakna di jalan kita masing-masing. Semoga Mama dan Ayah senantiasa diberikan kesehatan dan umur yang panjang agar dapat terus menemani dan menyaksikan hari di mana satu per satu harapan penulis dapat tercapai.
7. Untuk kakak dan adik-adikku, Randi Supriadi (Abang), Dwi Lystika Yuni (Kakak), dan Aresha Aqilla Khairina (Adek). Terima kasih Abang atas dukungannya selama ini. Terima kasih Kakak atas kasih sayang, perhatian, pengertian, dan kebahagiaan yang diberikan kepada penulis. Tidak terhitung berapa malam yang kita habiskan untuk bercerita dan tertawa bersama hanya untuk sekedar melupakan kesedihan yang tidak bisa kita ungkapkan. Penulis sangat bersyukur kamu hadir sebagai adik pertama yang penulis miliki. Terima kasih juga untuk Adek, kehadiranmu yang sempat penulis ragukan ternyata mampu memberikan kebahagiaan tak terhingga dalam hidup penulis. Terima kasih atas semua kehangatan keluarga yang kalian berikan, penulis tidak akan dapat bertahan sejauh ini jika bukan karena kalian. Kalian selalu menjadi motivasi atas setiap usaha dan pencapaian

yang penulis perjuangkan. Semoga Kakak dan Adek dapat mencapai apa yang kalian inginkan atau bahkan melampaui pencapaian Mbak. Mbak akan terus berusaha agar kalian dapat merasakan kehidupan yang lebih baik di kemudian hari. Semoga di masa depan kita dapat terus bersama dalam menemukan kebahagiaan kita.

8. Nenek (Emak) dan Kakek penulis terima kasih atas doa, dukungan, restu, dan kasih sayang yang telah diberikan kepada penulis. Khususnya untuk Emak, maaf penulis terlambat menyelesaikan skripsi ini. Penulis tidak bisa menepati janji untuk bisa wisuda dan dihadiri Emak. Emak tidak bisa melihat penulis meraih gelar yang penulis sedang perjuangkan. Maaf dan terima kasih Mak atas semua doa yang Emak berikan, sekarang giliran penulis yang akan terus mendoakan Emak, semoga Emak ditempatkan di surga terbaik Allah.
9. Sahabat sekaligus keluarga, Karilda Kurniati dan Windy Rahmaillah. Terima kasih kalian selalu kebersamai penulis hingga saat ini. Untuk Karilda, terima kasih sudah hadir dalam kehidupan penulis dari jenjang pendidikan menengah pertama hingga kita sama-sama duduk dibangku perkuliahan. Kamu bukan sekedar sahabat, kamu keluarga yang penulis sangat sayangi. Terima kasih atas banyak waktu yang kita lalui bersama. Terima kasih kamu selalu ada di samping penulis disaat penulis sedang terpuruk dan butuh pertolongan. Kamu tetap ada, menjulurkan tangan dan menarik penulis keluar dari masa-masa yang sulit. Untuk Windy, meskipun kita baru bertemu saat menjadi mahasiswa baru, tetapi semua waktu yang kita lalui sangat berharga. Terima kasih telah hadir menjadi teman dan sahabat yang selalu menemani penulis dalam menghadapi setiap persoalan. Penulis sangat bersyukur memiliki sahabat seperti kalian, semua cerita, tawa, tangisan, dan kebersamaan kita tidak akan pernah penulis lupakan. Semoga ke depannya kita tetap menjadi sahabat yang saling membahagiakan satu-sama lain.
10. Sahabat-sahabatku “Sat Set Sat Set” khususnya Karilda, Windy, Salma, Dian, Mezha, Atika, dan Dewi. Terima kasih penulis ucapkan atas semua bantuan, doa, dan dukungan yang kalian berikan selama perkuliahan.

Terima kasih sudah membuat masa-masa perkuliahan penulis menjadi hari-hari yang membahagiakan. Terima kasih atas semua pengalaman dan kebersamaan kita hingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Semua cerita, tawa, dan kesulitan selama perkuliahan yang kita lalui menjadi kenangan berharga yang selamanya akan penulis ingat. Semoga kita dapat mencapai semua yang kita impikan dan semoga ke depannya kita dapat hidup lebih bermakna dan bahagia.

11. Kepada teman-teman Jurusan Ekonomi Pembangunan 2021, khususnya Vania, Cahyaning, dan semua tidak bisa penulis sebutkan satu per satu, terima kasih atas semangat, dukungan, dan doa yang telah kalian berikan sepanjang perjalanan ini.
12. Teman-teman Kuliah Kerja Nyata (KKN), Indy, Lisa, Angel, Rizki, Bobby, dan Irdy. Terima kasih kalian sudah memberikan pengalaman berharga selama masa KKN.
13. Ibu Mundy dan Bapak terima kasih atas doa, dukungan, dan semangat yang diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
14. Tak lupa, apresiasi sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas segala bantuan dan dukungan yang diberikan kepada penulis.
15. Terakhir, terima kasih kepada Rima Herlista selaku penulis. Terima kasih telah bertahan sejauh ini. Terima kasih banyak kamu tidak menyerah ketika jalan di depan terasa gelap, ketika keraguan datang silih berganti, dan ketika langkah terasa berat untuk di teruskan. Jalan yang kamu hadapi tidak mudah, selalu ada momen ketika kamu tidak punya pilihan lain selain menyerah tapi kamu masih mau mempercayai bahwa kamu hadir di dunia tidak mungkin tidak ada artinya. Banyak hal yang terjadi dalam hidupmu, meskipun harus menghadapi kegagalan, kebingungan, bahkan perasaan ingin menyerah. Terima kasih karena sudah berani memilih, memilih untuk mencoba, memilih untuk belajar, memilih untuk merelakan, memilih untuk berjuang, memilih untuk ikhlas, dan memilih untuk menyelesaikan apa yang telah kamu mulai. Ke depannya akan tidak mudah tapi kamu harus terus melangkah dan percaya akan ada akhir indah di ujung perjalanan ini. Tetap

semangat dan ingat banyak orang yang mendukung dan mendoakan keberhasilan mu.

Sebagai penutup, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Namun, besar harapan skripsi ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi para pembaca. Semoga segala dukungan, bimbingan, dan doa yang telah diberikan kepada penulis mendapatkan balasan yang melimpah dari Allah SWT. Aamiin.

Bandar Lampung, 27 Januari 2026

Penulis

Rima Herlista

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	19
1.3 Tujuan Penelitian.....	19
1.4 Manfaat Penelitian	19
II. TINJAUAN PUSTAKA	21
2.1 Kajian Teori.....	21
2.1.1 Teori Environmental Kuznet Curve (EKC).....	21
2.1.2 Teori Schumpeter	23
2.1.3 Teori Sustainable Development (Pembangunan Berkelanjutan).....	24
2.1.4 Jejak Karbon (Carbon Footprint)	26
2.1.5 Sumber Energi.....	27
2.1.6 Investasi.....	28
2.1.7 Lahan Pertanian.....	30
2.1.8 Industri 4.0	32
2.2 Kajian Empiris	34
2.3 Kerangka Pemikiran.....	39

2.4	Hipotesis.....	42
III. METODE PENELITIAN		43
3.1	Jenis dan Sumber Data	43
3.1.1	Jenis Penelitian.....	43
3.1.2	Sumber Data.....	43
3.2	Definisi Operasional Variabel	45
3.3	Metode Analisis Data	46
3.3.1	Uji Stasioneritas	47
3.3.2	Uji Kointegrasi	48
3.3.3	Metode Regresi Panel FMOLS	49
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN		55
4.1	Hasil Pengolahan Data	55
4.1.1	Analisis Statistik Deskriptif	55
4.1.2	Uji Stasioneritas	60
4.1.3	Uji Kointegrasi	64
4.1.4	Regresi Panel FMOLS	67
4.2	Pembahasan Hasil Penelitian	72
4.2.1	Hubungan Konsumsi Energi Terbarukan dan Emisi CO2	73
4.2.2	Hubungan Investasi Asing Langsung dan Emisi CO2	77
4.2.3	Hubungan Lahan Pertanian dan Emisi CO2	79
4.2.4	Hubungan Industri 4.0 dan Emisi CO2	86
4.3	Implikasi Hasil Penelitian	90
4.3.1	Kawasan ASEAN	90
4.3.2	Kawasan SAARC.....	90
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....		91
5.1	Kesimpulan	91

5.2	Saran.....	93
DAFTAR PUSTAKA.....		95
LAMPIRAN.....		110

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Penelitian Terdahulu.....	34
2. Variabel, Simbol, dan Sumber Data	44
3. Definisi Operasional Variabel	45
4. Analisis Statistik Deskriptif di Kawasan ASEAN	55
5. Analisis Statistik Deskriptif di Kawasan SAARC	58
6. Uji Panel Unit Root di Kawasan ASEAN.....	60
7. Uji Panel Unit Root di Kawasan SAARC.....	62
8. Uji Kointegrasi Pedroni dan Kao di Kawasan ASEAN	64
9. Uji Kointegrasi Pedroni dan Kao di Kawasan SAARC	66
10. Estimasi Panel FMOLS di Kawasan ASEAN.....	68
11. Estimasi Panel FMOLS di Kawasan SAARC.....	70
12. Koefisien Regresi Parsial di Kawasan ASEAN dan SAARC	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Emisi CO ₂ Dunia (Milliar ton)	3
2. Emisi CO ₂ Negara-Negara <i>Low-Middle Income</i> di Kawasan ASEAN dan SAARC pada Periode Tahun 1992-2021 (Juta ton).....	6
3. Konsumsi Energi Terbarukan Negara-Negara <i>Low-Middle Income</i> di Kawasan ASEAN dan SAARC pada Periode Tahun 1992-2021 (% dari Total Konsumsi Energi).....	10
4. Investasi Asing Langsung, Arus Masuk Bersih Negara-Negara <i>Low-Middle Income</i> di Kawasan ASEAN dan SAARC pada Periode Tahun 1992-2021 (% dari PDB).....	12
5. Lahan Pertanian Negara-Negara <i>Low-Middle Income</i> di Kawasan ASEAN dan SAARC pada Periode Tahun 1992-2021 (% dari Area Lahan).....	15
6. Proporsi Nilai Tambah Manufaktur Berteknologi Menengah-Tinggi Negara-Negara <i>Low-Middle Income</i> di Kawasan ASEAN dan SAARC pada Periode Tahun 1992-2021 (% dari Nilai Tambah Manufaktur).....	17
7. Tahapan dalam Hubungan Pertumbuhan Ekonomi dan Kualitas Lingkungan	22
8. Kerangka Pemikiran.....	41
9. Data Lahan Pertanian dan Emisi CO ₂ di Vietnam pada Periode Tahun 2017-2018.....	81
10. Data Lahan Pertanian dan Emisi CO ₂ di Bangladesh pada Periode Tahun 2013-2019.....	83

11. Data Proporsi Nilai Tambah Manufaktur Berteknologi Menengah-Tinggi dan Emisi CO2 di Bangladesh pada Periode Tahun 2010-2015.....	87
---	----

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

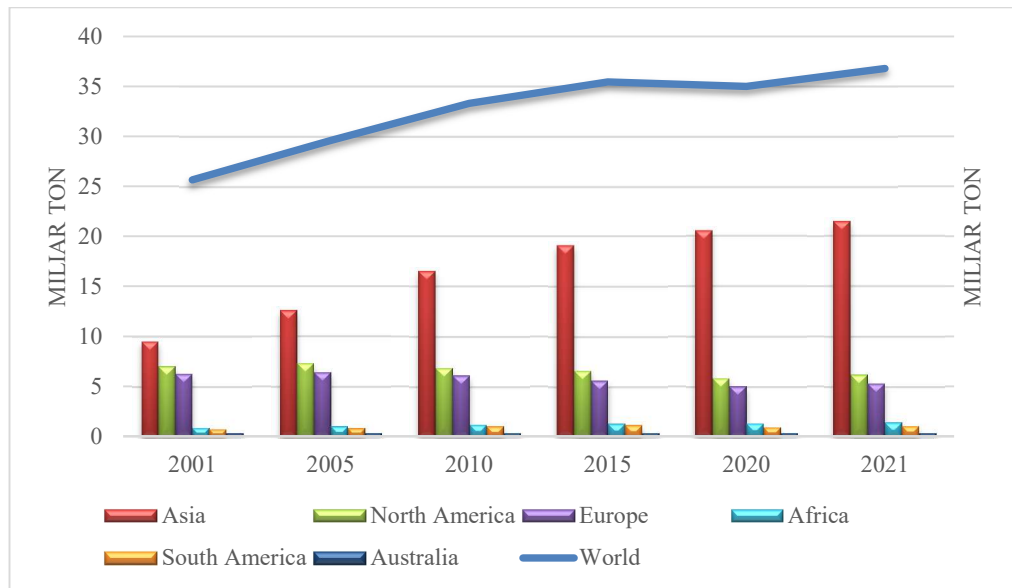
Selama lebih dari dua dekade, perubahan iklim dan meningkatnya pemanasan global telah menjadi isu penting dan mendapat perhatian serius di tingkat global (Sahoo & Sahoo, 2022). Perubahan iklim merupakan salah satu tantangan global yang menimbulkan ancaman serius terhadap kelangsungan hidup di bumi dalam jangka panjang (Tsimisaraka et al., 2023). Perubahan iklim menimbulkan dampak dan risiko yang melebihi batas adaptasi lingkungan serta mengakibatkan kerugian dan kerusakan yang signifikan. Perubahan iklim yang terjadi ini berdampak langsung pada kesehatan manusia, fungsi ekosistem, struktur hutan, ketahanan pangan, dan mata pencaharian masyarakat yang bergantung pada sumber daya (IPCC, 2022). Salah satu indikator utama dari perubahan iklim adalah fenomena kenaikan suhu global atau pemanasan global (Wahyudi et al., 2024). *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) merilis data bahwa dalam dua dekade pertama abad ke-21 yaitu dari Tahun 2001 hingga 2021, suhu permukaan global meningkat sebesar 0,99 °C dibandingkan periode Tahun 1850-1900 (dari 0,84 hingga 1.10 °C). Pemanasan global ini menjadi salah satu masalah paling kompleks karena berkontribusi terhadap degradasi lingkungan yang berdampak luas pada kehidupan makhluk hidup (Prinadi et al., 2022).

Salah satu dampak signifikan dari degradasi lingkungan adalah meningkatnya emisi gas rumah kaca (GRK) (Abdullah, 2015). Perubahan iklim yang dipicu oleh pemanasan global dan peningkatan emisi GRK memberikan dampak yang besar terhadap perekonomian suatu wilayah (Musyarof & Qomari, 2023). Gas rumah kaca yang terus meningkat dapat menyebabkan munculnya cuaca ekstrem yang merusak ekosistem alam, sarana dan infrastruktur, serta rusaknya

lahan pertanian. Hal ini tidak hanya menimbulkan efek pada ekonomi global, namun juga pada masalah kesehatan, keamanan pangan, dan lain sebagainya (Mukhtarov et al., 2023). Kondisi ini menunjukkan bahwa kerusakan lingkungan yang terus terjadi akan memberikan efek negatif yang luas pada berbagai aspek kehidupan manusia, baik dari segi ekonomi, sosial, maupun lingkungan secara keseluruhan (J. L. Liu et al., 2020; Tian, 2020).

GRK yang memicu terjadinya perubahan iklim dan polusi udara ini diukur oleh jejak karbon (European Commission, 2024). Secara umum, jejak karbon mengacu pada sejumlah emisi gas yang relevan dengan perubahan iklim dan terkait dengan aktivitas produksi atau konsumsi manusia (Gan et al., 2011). Jejak karbon dapat didefinisikan sebagai ukuran keseluruhan emisi CO₂ yang disebabkan secara langsung dan tidak langsung melalui akumulasi aktivitas suatu produk (Durojaye et al., 2020). Jejak karbon merupakan komponen cepat berkembang yang saat ini menyumbang 60% persen dari keseluruhan jejak ekologis umat manusia (Global Footprint Network, 2024). Sehingga jejak karbon perlu dikurangi atau bahkan mencapai *net zero emission* guna membatasi pemanasan global yang kian memburuk secara bertahap (Calvin et al., 2023).

Menyadari akan pentingnya penanganan jejak karbon, beberapa negara di dunia mengambil langkah untuk mengurangi emisi CO₂, seperti *Kyoto protocol* dan *Paris agreement* (Mukhtarov et al., 2023). Hampir seluruh negara di dunia yaitu 195 negara terlibat dalam Perjanjian Paris pada Tahun 2015 sebagai upaya penurunan gas emisi untuk menciptakan kehidupan yang layak di masa mendatang. Perjanjian Paris atau *Paris Agreement* ini memiliki tujuan agar negara-negara di dunia dapat berkontribusi secara bersama-sama untuk menekan laju peningkatan suhu rata-rata gas emisi paling maksimal sebesar 1,5 derajat celsius (Baroleh et al., 2023). Berbeda dengan apa yang menjadi kesepakatan dalam *Paris Agreement*, emisi CO₂ secara global terus menunjukkan tren yang meningkat. Berikut ini merupakan data terkait emisi CO₂ secara global pada periode Tahun 2001-2021.



Sumber: *Global Carbon Budget (data diolah 2024)*

Gambar 1 Emisi CO₂ Dunia (Milliar ton)

Gambar 1. Menunjukkan bahwa emisi CO₂ secara global mengalami peningkatan setiap tahunnya. Berdasarkan Gambar 1, emisi CO₂ secara global mengalami peningkatan tertinggi pada Tahun 2021 yaitu sebesar 5,17% (36,82 Mt – 37,15 Mt) bila dibandingkan dengan periode-periode sebelumnya. Asia menjadi salah satu wilayah penyumbang emisi CO₂ terbesar, hampir setengah emisi CO₂ global. Kawasan Asia sendiri mengalami peningkatan emisi CO₂ sebesar 4,48% dari 20,52 Mt pada Tahun 2020 menjadi 21,44 Mt di Tahun 2021.

Peningkatan emisi CO₂ di Asia dipicu oleh jumlah penduduk yang tinggi. Asia merupakan kawasan yang memiliki jumlah populasi paling banyak di dunia dengan jumlah penduduk mencapai 4.688 miliar jiwa pada Tahun 2021 atau setara dengan 59.76% dari total populasi dunia. Tingginya populasi di Asia ini menyebabkan penyusutan wilayah pemukiman sehingga dilakukannya ekspansi di wilayah hijau guna menciptakan pemukiman baru (Adrian, 2023). Hal ini mengakibatkan terjadinya pengikisan lahan hutan sehingga hutan kehilangan fungsinya sebagai penyerap alami emisi CO₂. Selain itu, peningkatan populasi juga menyebabkan kebutuhan akan konsumsi energi suatu wilayah turut

mengalami peningkatan (Prinadi et al., 2022). Akibatnya, eksploitasi sumber daya alam terbarukan seperti bahan bakar fosil semakin dilakukan, meskipun hal ini berdampak terhadap kerusakan lingkungan yang kian memburuk.

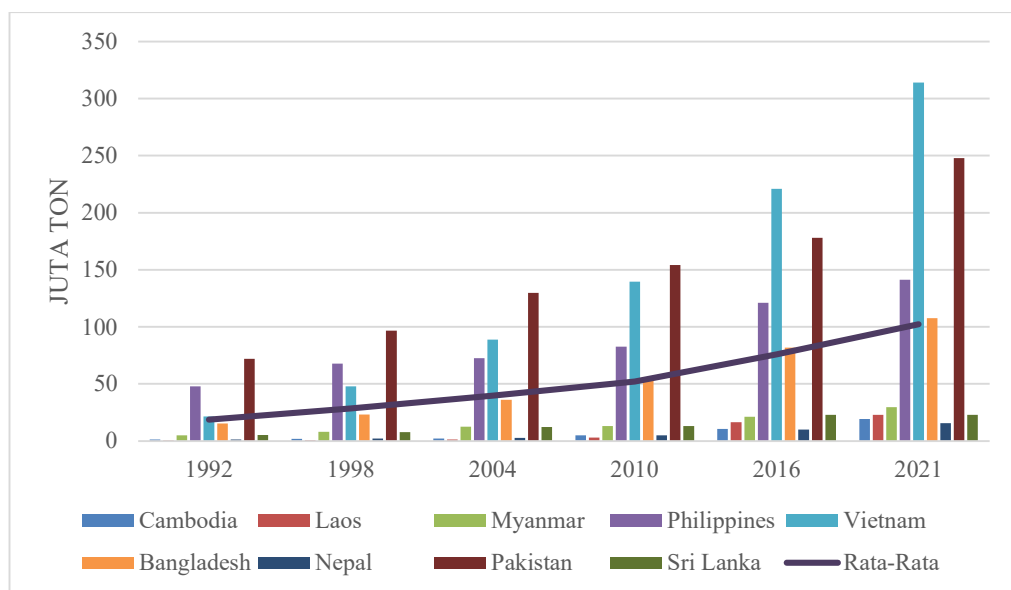
Seiring dengan meningkatnya jumlah populasi, kegiatan perekonomian masyarakat juga turut mengalami peningkatan. Peningkatan kegiatan ekonomi masyarakat seperti pada sektor industri dan manufaktur dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap perekonomian negara. Di samping berkontribusi pada pertumbuhan ekonomi negara, peningkatan kegiatan perekonomian di masyarakat juga berdampak pada kondisi lingkungan yang semakin memburuk atau terjadinya degradasi lingkungan. Hal ini terjadi sebab pembangunan ekonomi sering dianggap sebagai kegiatan besar besaran dalam mengonversi sumber daya alam menjadi sumber daya buatan dengan kata lain sumber daya alam dimanfaatkan secara berlebihan tanpa memikirkan efeknya terhadap lingkungan (Danhas & Muchtar, 2021; Noor & Saputra, 2020; Saqib, 2022).

Negara-negara di Asia terutama di Kawasan Asia Tenggara yang tergabung dalam organisasi kerja sama regional ASEAN (*Association of Southeast Asian Nations*) seperti Indonesia, Malaysia, Singapura, Brunei Darussalam, Myanmar, Vietnam, Filipina, Thailand, Laos, Kamboja, dan Timor Leste. Selain itu, di Kawasan Asia Selatan yang tergabung dalam organisasi kerja sama regional SAARC (*South Asian Association for Regional Cooperation*) seperti India, Afganistan, Bangladesh, Bhutan, Nepal, Pakistan, Maladewa, dan Sri Lanka. Negara-negara di dua kawasan ini mayoritas merupakan negara berkembang yang juga turut berupaya dalam meningkatkan pertumbuhan ekonomi mereka. *SDG Progress Report* di Asia -Pasifik yang dirilis oleh *Economic and Social Commission for Asia and the Pacific* (ESCAP, 2021) menyebutkan bahwa Asia Tenggara dan Asia Selatan mengalami peningkatan pada tujuan SDGs nomor 9 yaitu inovasi, industri, dan infrastruktur. Hal ini menandakan bahwa negara-negara di ASEAN dan SAARC semakin mengandalkan sektor industri dan manufaktur sebagai pendorong utama perekonomian negara (ESCAP, 2022).

Sektor industri dan manufaktur yang mengalami kemajuan ini membawa tantangan baru terkait industri berkelanjutan dan dampaknya terhadap lingkungan. Meskipun terjadi perkembangan pada sektor industri, mayoritas negara-negara di Kawasan ASEAN dan SAARC masih belum mampu mengadopsi penggunaan energi yang rendah karbon (Bank Dunia, 2024). Sementara itu, dalam laporan ESCAP 2021, Kawasan Asia Tenggara dan Asia Selatan ini menjadi dua 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 dua kawasan ini belum mampu menyeimbangkan antara pertumbuhan ekonomi dan pelestarian lingkungan.

Bank dunia mengklasifikasikan perekonomian suatu negara berdasarkan pendapatannya yaitu, *lower income*, *lower-middle income*, *upper-middle income*, dan *high income* (Wahyudi et al., 2023). Negara-negara *low-middle income* di Asia, khususnya di ASEAN dan SAARC merupakan negara-negara dengan tingkat pertumbuhan ekonomi yang rendah, namun menunjukkan peningkatan perekonomian yang signifikan. Negara-negara berpenghasilan menengah kebawah atau yang termasuk ke dalam kategori *low-middle income* di Kawasan ASEAN seperti Kamboja, Laos, Myanmar, Filipina, Vietnam dan 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 CO₂. 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). Hal ini menjadi pertimbangan mengapa penelitian ini memilih negara-negara dengan kategori *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan SAARC sebagai lokasi penelitian sebab negara-negara dengan kategori ini berpotensi sebagai penyumbang emisi CO₂ yang tinggi bila dibandingkan dengan negara-negara *high income*.

Negara-negara dengan kategori *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan Kawasan SAARC ini menghadapi tantangan besar dalam menjaga keseimbangan antara pertumbuhan ekonomi dan pelestarian lingkungan. Adanya peran besar dari peningkatan populasi dan semakin berkembangnya sektor manufaktur dalam mendorong pertumbuhan ekonomi ini perlu diseimbangkan dengan upaya kolektif dalam meningkatkan efisiensi energi, pemanfaatan teknologi yang lebih ramah lingkungan, serta praktik industri berkelanjutan guna mengurangi emisi CO₂. Sejauh ini negara-negara kategori *low-middle income* masih belum melakukan upaya maksimal dalam mengurangi emisi CO₂, hal ini ditandai oleh semakin meningkatnya angka emisi CO₂ yang dialami negara-negara *low-middle income* di kedua kawasan ini. Berikut ini adalah data terkait emisi CO₂ negara-negara dengan kategori *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan SAARC pada periode Tahun 1992-2021.



Sumber: *Global Carbon Budget (data diolah 2024)*

Gambar 2 Emisi CO₂ Negara-Negara *Low-Middle Income* di Kawasan ASEAN dan SAARC pada Periode Tahun 1992-2021 (Juta ton)

Gambar 2 menunjukkan bahwa pertumbuhan emisi CO₂ di negara-negara ini masih relatif tinggi dan setiap tahunnya cenderung mengalami trend yang

positif. Vietnam mencatat peningkatan emisi yang signifikan yaitu sebesar 352 juta ton pada Tahun 2021. Hal ini menjadikan Vietnam sebagai salah satu penyumbang emisi terbesar di dua kawasan yaitu ASEAN dan SAARC. Di sisi lain, negara-negara seperti Laos, Nepal, Sri Lanka dan Kamboja menunjukkan level emisi CO₂ yang lebih rendah, yakni di bawah 30 juta ton pada periode yang sama. Rata-rata emisi CO₂ di dua kawasan ini juga terus meningkat sepanjang Tahun 1992-2021. Hal ini sejalan dengan pertumbuhan ekonomi di dua kawasan yang terus mengalami peningkatan selama 30 tahun terakhir.

Peningkatan emisi CO₂ yang signifikan di negara-negara seperti Vietnam, Filipina, dan Pakistan mencerminkan adanya hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan kerusakan lingkungan. Di awal tahap pembangunan ekonomi di suatu negara, industrialisasi dan urbanisasi sering kali disertai dengan meningkatnya konsumsi energi tidak terbarukan seperti bahan bakar fosil, yang menjadi pendorong utama semakin meningkatnya emisi CO₂ (Santana & Maria, 2024). Hal ini juga sejalan dengan meningkatnya kontribusi sektor manufaktur terhadap pertumbuhan ekonomi di beberapa negara, seperti Vietnam yang menunjukkan bahwa perkembangan industri terjadi dengan disertai adanya eksternalitas negatif terhadap lingkungan. Teori Environmental Kuznets Curve (EKC) berpendapat bahwa pada awalnya, kegiatan ekonomi yang dilakukan di suatu negara cenderung menyebabkan polusi (Sun et al., 2023). Setelah mencapai tahap tertentu atau ketika pendapatan per kapita sebuah negara mencapai titik tertentu, kerusakan lingkungan mulai berkurang seiring dengan meningkatnya kesadaran akan pentingnya kesehatan lingkungan.

Penelitian tentang jejak karbon yang diukur oleh emisi CO₂ ini telah banyak dilakukan sebelumnya, misalnya penelitian oleh Adrian (2023), He et al., (2024), Tanveer et al., (2024), Su et al., (2023), Voumik et al., (2023), Mubarak AS & Endraswati (2023), dan Khan et al., (2019). Perbedaan penelitian ini dengan penelitian-penelitian sebelumnya terletak pada lokasi penelitian. Penelitian oleh Adrian (2023), Mubarak AS & Endraswati (2023), dan Khan et

al., (2019) hanya berfokus di Kawasan ASEAN, sedangkan penelitian oleh He et al., (2024), Sun et al., (2023), dan (Voumik, Hossain, et al., 2023) hanya berfokus pada kawasan Asia Selatan (SAARC). Berbeda dengan penelitian yang dilakukan sebelumnya, penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki bagaimana perbedaan jejak karbon yang diukur oleh emisi CO₂ di dua kawasan berbeda yaitu ASEAN dan SAARC dengan periode penelitian mulai dari Tahun 1992-2021. Penelitian ini juga berupaya mengkaji jejak karbon dari sisi ekonomi dan non-ekonomi. Dari sisi ekonomi, variabel yang diduga berpengaruh terhadap jejak karbon adalah konsumsi energi terbarukan, investasi asing langsung, dan industri 4.0. Sedangkan, dari sisi non-ekonomi (sisi lingkungan), variabel yang diduga berpengaruh terhadap jejak karbon adalah lahan pertanian.

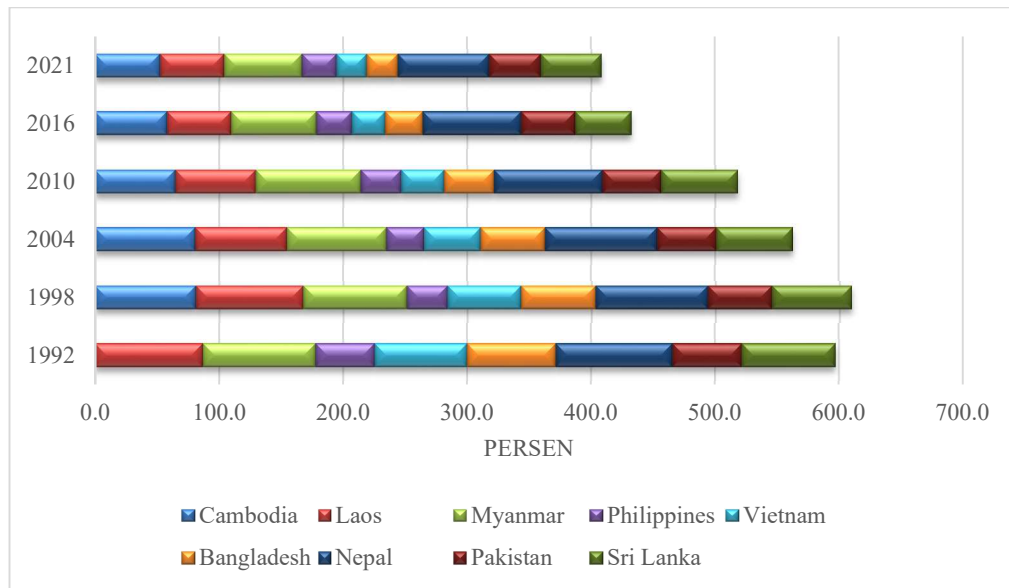
Negara-negara di dunia sedang menghadapi tantangan besar dalam mengelola sektor energi, sebab pertumbuhan sosial-ekonomi negara sangat berhubungan dengan bagaimana pengeluaran energi di negara tersebut (Mathur et al., 2022). Penggunaan energi yang efisien di suatu negara menjadi salah satu prasyarat dalam pembangunan ekonomi. Tetapi selama berabad-abad, manusia masih sangat bergantung pada bahan bakar fosil yang dapat merusak lingkungan (Wahyudi, 2024). *European Commission* menyatakan bahwa konsumsi energi menjadi salah satu faktor utama yang memicu peningkatan emisi CO₂. Sejak abad 19, emisi CO₂ yang berasal dari bahan bakar fosil secara konstan terus meningkat seiring dengan penggunaan mesin-mesin akibat timbulnya revolusi industri (Raza et al., 2023).

Di negara-negara berkembang, seperti negara-negara *low-middle income* di ASEAN dan SAARC, pertumbuhan populasi, urbanisasi, dan industrialisasi yang terjadi memicu meningkatnya permintaan energi (Gunarto et al., 2024). Ketersediaan energi dalam sebuah negara memiliki peran penting dalam menunjang aktivitas manusia dan industri yang sedang dikembangkan, namun sektor energi ini juga menjadi salah satu kontributor terbesar terjadinya kerusakan lingkungan (Tashim & Rudatin, 2023; Wahyudi & Palupi, 2023).

Terutama ketika sebagian besar sektor energi bergantung pada sumber tidak terbarukan seperti bahan bakar fosil, minyak bumi, batu bara dan gas alam. Penggunaan energi secara berlebihan dan tidak efisien di berbagai sektor, seperti transportasi, industri, dan rumah tangga akan memperburuk dampak lingkungan yang ditandai dengan meningkatnya emisi CO₂ seiring dengan peningkatan konsumsi energi (Adrian, 2023; Shaari et al., 2020).

Dalam rangka melindungi lingkungan dan mencapai tujuan pembangunan yang berkelanjutan, penggunaan energi terbarukan didorong untuk menggantikan peran energi fosil (Liu et al., 2020). Menurut *International Renewable Energy Agency* (IRENA), transisi energi ini merupakan peta jalan untuk mengubah industri energi global menjadi sistem yang sepenuhnya mengandalkan sumber energi bebas karbon sebagai pengganti bahan bakar fosil (Mukhtarov et al., 2023). Oleh karena itu, untuk memperoleh energi ramah lingkungan, setiap negara sebaiknya beralih dari penggunaan bahan bakar fosil menuju pemanfaatan energi terbarukan dan berbagai sumber alternatif energi terbarukan (Rahman et al., 2023). Sumber utama energi terbarukan ini mencakup tenaga air, surya, angin, panas bumi, dan biomassa, dan pasang surut air laut (Mathur et al., 2022).

Sejalan dengan penelitian oleh Sun et al., (2023) yang membuktikan bahwa konsumsi energi terbarukan berpengaruh negatif terhadap emisi CO₂ di Asia Selatan. Penelitian oleh Raihan & Tuspekova (2022) juga mengungkapkan bahwa penggunaan energi terbarukan dapat mengurangi emisi CO₂ dalam jangka panjang di Peru. Selain mengurangi emisi CO₂, penggunaan energi terbarukan memiliki manfaat sosial seperti penurunan biaya energi, peningkatan kualitas udara, dan kesehatan masyarakat yang lebih baik (Saqib, 2022). Sehingga, penelitian mengenai hubungan antara konsumsi energi terbarukan dan emisi CO₂ ini menjadi penting sebagai dasar perencanaan dalam pengelolaan sumber energi yang berkelanjutan. Berikut ini adalah data terkait konsumsi energi terbarukan di negara-negara dengan kategori *low-middle income* pada Kawasan ASEAN dan SAARC pada periode Tahun 1992-2021.



Sumber: *World Development Indicators (data diolah 2024)*

Gambar 3 Konsumsi Energi Terbarukan Negara-Negara *Low-Middle Income* di Kawasan ASEAN dan SAARC pada Periode Tahun 1992-2021 (% dari Total Konsumsi Energi)

Gambar 4 memperlihatkan bahwa sepanjang Tahun 1992-2021, konsumsi energi terbarukan negara-negara *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan Kawasan SAARC mengalami fluktuasi, tetapi cenderung dengan tren yang menurun. Pada Tahun 1998, Kamboja tercatat mengonsumsi energi terbarukan sebesar 81.3% dari total konsumsi energi. Namun, pada Tahun 2021, konsumsi energi terbarukan Kamboja turun hingga 52.4% dari total konsumsi energi. Sama halnya dengan Kamboja, tercatat bahwa Laos sepanjang periode 1992-2021 terus mengalami penurunan konsumsi energi terbarukan dari 86.6% pada Tahun 1998 menjadi 51,5% dari total konsumsi energi di Tahun 2021. Begitu pula negara-negara *low-middle income* di Kawasan SAARC, misalnya Sri Lanka dan Nepal yang juga mengalami penurunan konsumsi energi terbarukan. Konsumsi energi terbarukan Sri Lanka awalnya sebesar 62,2% pada Tahun 1992 menjadi 48,8% di Tahun 2021, sedangkan konsumsi energi Nepal dari awalnya sebesar 90,5% pada Tahun 1998 menjadi 73,7% di Tahun 2021. Hal ini menandakan bahwa negara-negara *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan

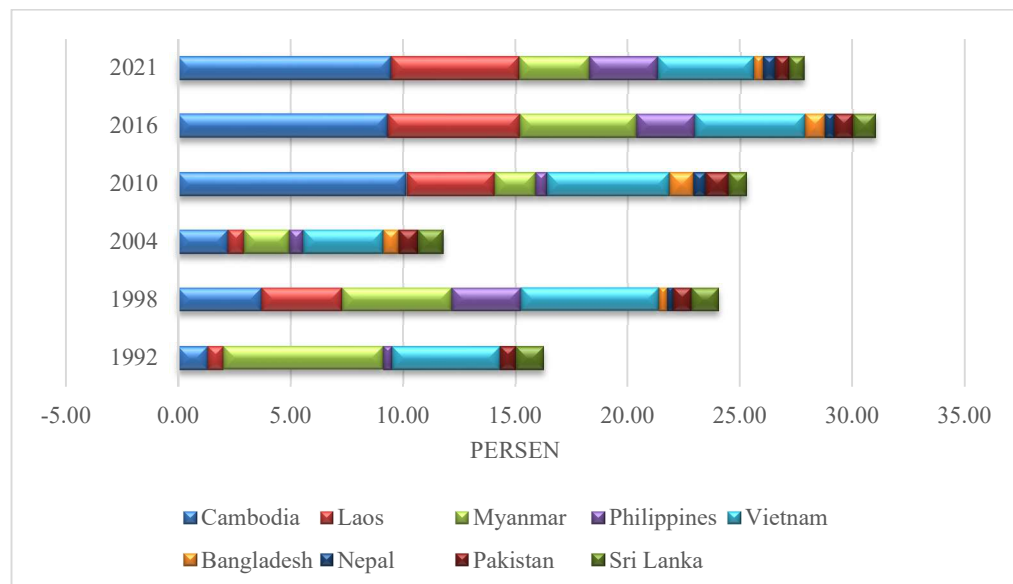
Kawasan SAARC masih sangat bergantung pada bahan bakar fosil, terutama batu bara dan minyak bumi dalam memenuhi konsumsi energi mereka.

Selain masalah konsumsi energi yang berlebihan, masuknya *Foreign Direct Investment* (Investasi Asing Langsung) ke negara berkembang, khususnya di negara-negara *low-middle income* Kawasan ASEAN dan SAARC juga dapat memperburuk emisi CO₂ di negara-negara tersebut. Investasi asing langsung dapat menyebabkan peningkatan emisi CO₂, sebab investasi asing kerap membawa teknologi dan penggunaan bahan bakar yang tidak ramah lingkungan ke negara penerima investasi (Mubarak AS & Endraswati, 2023). Hal ini sejalan dengan *Pollution Haven Hypothesis* (PHH), yang menyatakan bahwa arus modal asing langsung menuju negara-negara berkembang didorong oleh adanya peluang menghindari regulasi lingkungan yang ketat dan biaya produksi yang lebih rendah dibandingkan negara asal perusahaan (Levinson & Taylor, 2008).

Akibatnya, negara-negara berkembang kerap menjadi tujuan investasi bagi industri-industri yang menghasilkan polusi tinggi, seperti industri pertambangan, energi fosil, dan manufaktur berat. Hal ini sejalan dengan beberapa penelitian seperti penelitian oleh Sun et al., (2023) yang menunjukkan bahwa investasi asing langsung secara signifikan dapat meningkatkan emisi CO₂ di Asia Selatan. Mubarak AS & Endraswati (2023) dalam penelitiannya juga menemukan bahwa investasi asing langsung berpengaruh secara positif terhadap emisi CO₂ di ASEAN. Selain itu, penelitian oleh Samreen et al., (2021) dan Chiriluş & Costea (2023) juga menunjukkan bahwa terdapat hubungan positif dan signifikan antara investasi asing langsung dan emisi CO₂. Hasil dari penelitian-penelitian ini membuktikan bahwa investasi asing langsung di negara berkembang mendukung hipotesis *Polution Heaven* (HPP).

Investasi asing langsung yang masuk ke negara berkembang ini sering kali tidak diimbangi dengan kebijakan keberlanjutan yang memadai. Sebagian negara-negara berkembang di Asia, seperti negara-negara *low-middle income* di ASEAN dan SAARC tidak ketat dalam proteksi lingkungan seiring dengan

upaya peningkatan perekonomian negara (Wang & Liu, 2022; Wei et al., 2023). FDI dianggap negara-negara penerima investasi sebagai sumber pendanaan yang signifikan bagi perekonomian, namun modal ini memiliki konsekuensi negatif terhadap lingkungan (Chiriluş & Costea, 2023). Investasi asing sebagai bentuk kerja sama suatu negara ini dapat memperburuk masalah lingkungan, terutama diakibatkan oleh emisi CO₂ yang dihasilkan dari sektor industri tidak berkelanjutan (Tashim & Rudatin, 2023). Sehingga, meneliti bagaimana investasi asing langsung mempengaruhi peningkatan emisi CO₂ ini sangat penting dalam tata kelola karbon lintas wilayah atau bahkan antar negara. Berikut ini adalah data terkait investasi asing langsung negara-negara *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan SAARC pada periode Tahun 1992-2021.



Sumber: *World Development Indicators* (data diolah 2024)

Gambar 4 Investasi Asing Langsung, Arus Masuk Bersih Negara-Negara *Low-Middle Income* di Kawasan ASEAN dan SAARC pada Periode Tahun 1992-2021 (% dari PDB)

Gambar 5 menunjukkan bahwa investasi asing langsung di negara-negara *low-middle income* Kawasan ASEAN dan SAARC sepanjang periode 1992-2021 mengalami fluktuasi. Kamboja menjadi negara dengan jumlah investasi asing langsung terbanyak di Kawasan ASEAN dan SAARC yakni sebesar 12,92%

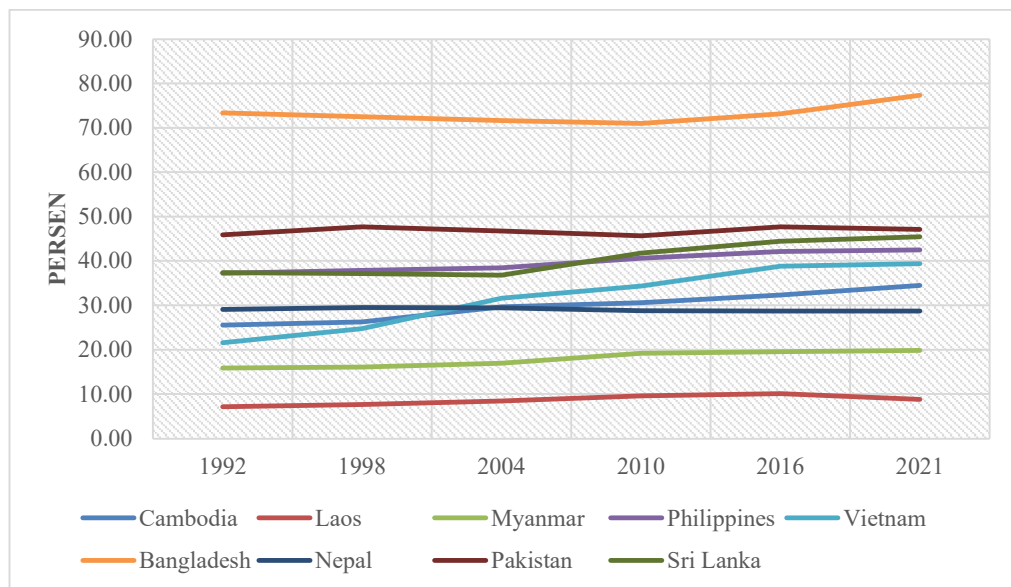
dari total PDB pada Tahun 2021. Di tahun yang sama, Vietnam, Filipina, dan Myanmar memiliki investasi asing langsung sekitar 3-4% dari total PDB. Investasi asing langsung yang masuk ke negara-negara *low-middle income* di Kawasan SAARC sendiri tidak mencapai 1 persen dari total PDB di Tahun 2021, yakni Bangladesh sebesar 0,14%, Nepal sebesar 0,53%, Pakistan sebesar 0,62%, dan Sri Lanka sebesar 0,67%. Perbedaan di kedua kawasan ini menandai adanya kesenjangan daya tarik investasi antara kedua kawasan, yang hal ini dapat mempengaruhi perkembangan sektor ekonomi, termasuk sektor industri dan sektor pertanian, serta dampaknya terhadap emisi CO₂.

Selain faktor ekonomi seperti konsumsi energi terbarukan dan investasi asing langsung, penelitian ini juga melakukan pendekatan non-ekonomi yaitu dari sisi lingkungan. Salah satu faktor lingkungan yang secara signifikan berkontribusi terhadap emisi CO₂, selain deforestasi adalah sektor pertanian. Negara-negara di dunia, terlepas dari tingkat perekonomiannya, tetap memerlukan sektor pertanian dalam menopang keberlanjutan kehidupan sosial masyarakat dan struktur ekonomi, tak terkecuali negara-negara *low-middle income* di ASEAN dan SAARC. Negara berkembang di Asia Selatan dan Asia Tenggara ini cenderung mengandalkan sektor pertanian dalam pembangunan berkelanjutan dan kelangsungan hidup masyarakat (Kapçak & İşleyen, 2024). Output yang dihasilkan dalam sektor pertanian sangat penting dalam menjaga ketahanan pangan dan pembangunan ekonomi (Raihan et al., 2022). Sektor pertanian mencakup produksi berbagai jenis biji-bijian, bahan baku, dan hasil segar seperti sayuran dan buah-buahan, serta pemasaran produk-produk tersebut di sepanjang rantai pasokan pangan (Gan et al., 2011). Disamping sebagai sektor krusial sebagai penyedia pasokan pangan, lahan pertanian memproduksi sekitar 20% karbon dioksida secara global (Lu et al., 2018). Walaupun pembakaran bahan bakar fosil tetap pendorong utama meningkatnya level gas rumah kaca, pertanian dan perubahan penggunaan lahan juga secara substansial berkontribusi pada peningkatan emisi CO₂ (Kumar & Aravindakshan, 2022).

Penelitian oleh Tanver et al (2024) menyebutkan bahwa lahan pertanian terbukti memiliki hubungan positif dan signifikan terhadap emisi CO₂ dalam jangka pendek maupun jangka panjang di Pakistan. Hal ini terjadi sebab sektor pertanian ini masih menerapkan metode pertanian konvensional yang memanfaatkan sumber energi tidak terbarukan seperti bahan bakar fosil, listrik, batu bara, dan gas alam untuk mengoperasikan mesin dan peralatan, memproduksi pupuk dan bahan kimia, serta irigasi dalam proses pertanian (Kapçak & İşleyen, 2024; Raza et al., 2023). Aktivitas-aktivitas ini sangat berkontribusi terhadap peningkatan emisi CO₂ yang bersumber dari pertanian. Selain itu, sektor pertanian, kehutanan, dan perubahan tata guna lahan (*agriculture, forestry, and other land use* -AFOLU), termasuk kegiatan seperti penggunaan lahan, perubahan lahan, dan kehutanan (*land use, land use change, and forestry*- LULUCF), menjadi kontributor utama kedua emisi CO₂ global yang semakin memperburuk kondisi lingkungan (Houghton et al., 2012). Dampak negatif dan kontribusi sektor pertanian terhadap emisi CO₂ ini menjadi salah satu pertimbangan dalam perencanaan adaptasi dan mitigasi terhadap kelangsungan lingkungan (Timilsina et al., 2019).

Berbeda dengan penelitian sebelumnya, penelitian yang dilakukan oleh Raihan dan Tuspekova (2022) menyebutkan bahwa produktivitas pertanian terbukti memiliki hubungan yang negatif dan signifikan terhadap emisi CO₂ dalam jangka panjang. Secara umum, emisi CO₂ dapat dikurangi dengan menyimpan karbon di vegetasi dan tanah, atau mengurangi emisi dengan mengubah waktu pembakaran sabana, mengelola limbah pertanian, atau tidak membersihkan vegetasi berkayu (White, 2022). Artinya, sektor pertanian dapat berperan dalam mengurangi emisi CO₂ jika dalam proses pertanian dilakukan secara berkelanjutan dan beralih dengan memanfaatkan sumber energi yang ramah lingkungan. Perbedaan hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa pengaruh lahan pertanian terhadap jejak karbon masih menjadi topik perdebatan. Hal ini menjadi alasan penting mengapa penelitian ini memilih lahan pertanian sebagai salah satu variabel yang diduga berkontribusi terhadap jejak karbon di Kawasan ASEAN dan SAARC. Data yang dirilis oleh Intergovernmental Panel on

Climate Change (IPCC, 2022) menunjukkan bahwa emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian meningkat secara global. Berikut ini adalah data terkait investasi asing langsung negara-negara *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan SAARC pada periode Tahun 1992-2021.



Sumber: *World Development Indicators* (data diolah 2024)

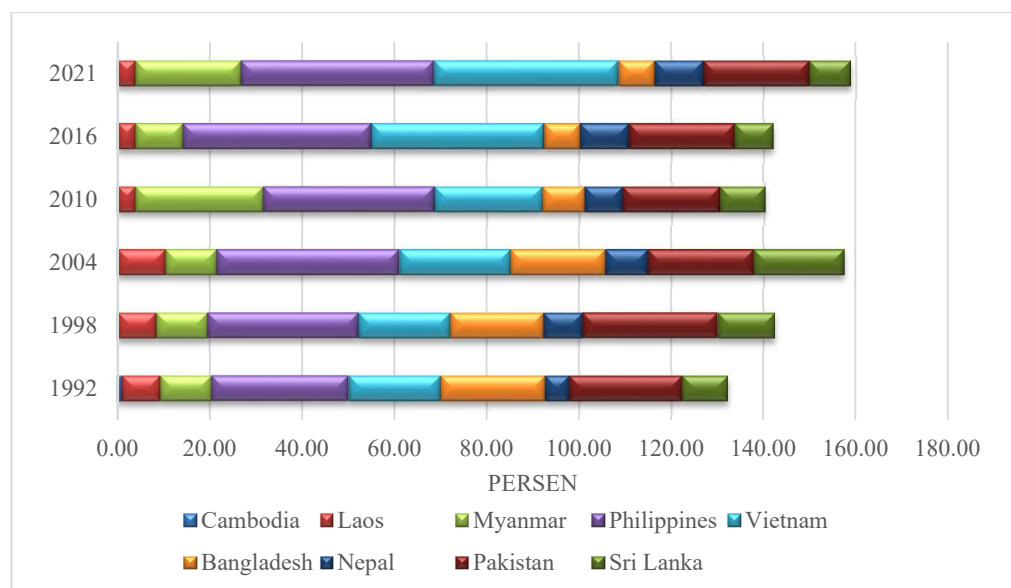
Gambar 5 Lahan Pertanian Negara-Negara *Low-Middle Income* di Kawasan ASEAN dan SAARC pada Periode Tahun 1992-2021 (% dari Area Lahan)

Gambar 5 menunjukkan bahwa lahan pertanian di negara-negara *low-middle income* Kawasan ASEAN dan SAARC pada periode Tahun 1992-2021 cenderung stabil dengan *trend* yang positif. Pada Tahun 2021 tercatat bahwa Bangladesh menjadi negara dengan luas lahan pertanian terbesar di kedua kawasan yaitu sebesar 77.35% dari area lahan, disusul oleh Pakistan dan Sri Lanka yang masing-masing sebesar 47.09% dan 45.46%. Sementara itu di Kawasan ASEAN luas lahan pertanian di Filipina sebesar 42.54%, Vietnam sebesar 39.43%, Kamboja sebesar 34.55%, dan Myanmar sebesar 19.89%. Hal ini menunjukkan adanya perbedaan kontribusi sektor pertanian terhadap perekonomian negara, namun secara umum perekonomian negara-negara di kedua kawasan ini bertumpu pada sektor pertanian.

Seiring dengan berbagai tantangan baik dari sisi ekonomi dan sisi lingkungan yang dihadapi negara-negara dengan kategori *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan SAARC ini, kemunculan industri 4.0 menjadi salah satu solusi potensial dalam mengurangi emisi CO₂. Pada awal tahap industrialisasi, terjadi pergeseran pola perekonomian dari sektor pertanian ke sektor manufaktur berat yang mendorong tingginya permintaan energi dan tingkat emisi CO₂ (Raihan & Tuspekova, 2022b). Terlepas dari kesadaran akan tingginya kebutuhan energi, banyak negara beralih dari model pertumbuhan ekonomi tradisional yang menekankan pada sektor manufaktur berat ke sektor yang berpusat pada inovasi teknologi yang lebih ramah lingkungan sebagai upaya mengurangi konsumsi energi dan emisi CO₂ yang disebabkan oleh industrialisasi (Mathur et al., 2022; Raihan, Hasan, et al., 2024; Wang & Liu, 2022). Transisi model perekonomian ini ditandai dengan kemunculan industri 4.0 dianggap sebagai paradigma baru dari sektor manufaktur modern yang akan membuka jalan dalam transformasi teknologi secara global (Bai et al., 2020).

Industri 4.0 merupakan konsep baru dalam sektor industri yang pertama kali diperkenalkan di Jerman selama acara *Hannover Fair* pada Tahun 2011, yang melambangkan awal dari revolusi industri ke-4 (Lucato et al., 2019; Ślusarczyk, 2018). Industri 4.0 menjadi era baru dalam perkembangan industri yang ditandai dengan tujuan untuk memperoleh produksi yang lebih efisien dengan menggunakan teknologi baru seperti *Internet on Things* (IoT), *Big Data*, dan *Cloud Computing*, serta kombinasi *human-machine* dalam mengoptimalkan sektor manufaktur (Balsalobre-Lorente et al., 2023; Tsai, 2023). 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 CO₂ dari sektor manufaktur.

Penelitian oleh He et al., (2024) membuktikan bahwa industri 4.0 berkontribusi secara signifikan terhadap pengurangan emisi CO₂. Selain itu beberapa penelitian seperti Bai et al., (2020) dan Yurtay, (2025) juga menyebutkan bahwa teknologi industri 4.0 memiliki potensi signifikan untuk mengurangi emisi CO₂ dalam proses manufaktur. Sehingga dalam jangka panjang, inovasi baru pada teknologi di sektor manufaktur dengan teknologi tinggi dan menengah diharapkan dapat memitigasi emisi CO₂ yang dihasilkan oleh aktivitas ekonomi, termasuk di sektor industri dan pertanian. Dengan memanfaatkan teknologi yang ramah lingkungan, negara-negara *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan SAARC tetap dapat meningkatkan pertumbuhan ekonomi mereka sejalan dengan keberlanjutan lingkungan (Sun et al., 2023; Tsimisaraka et al., 2023). Berikut ini adalah data terkait proporsi nilai tambah manufaktur berteknologi menengah dan tinggi negara-negara *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan SAARC pada periode Tahun 1992-2021.



Sumber: *World Development Indicators* (data diolah 2024)

Gambar 6 Proporsi Nilai Tambah Manufaktur Berteknologi Menengah-Tinggi Negara-Negara *Low-Middle Income* di Kawasan ASEAN dan SAARC pada Periode Tahun 1992-2021 (% dari Nilai Tambah Manufaktur)

Gambar 6 menunjukkan bahwa sepanjang Tahun 1992-2021, industri 4.0 yang diproksikan oleh proporsi nilai tambah manufaktur berteknologi menengah-

tinggi negara-negara *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan SAARC mengalami fluktuasi. Proporsi nilai tambah manufaktur berteknologi menengah dan tinggi negara-negara di Kawasan ASEAN selama periode Tahun 1992-2021 cenderung mengalami peningkatan, seperti Myanmar, Filipina, dan Vietnam. Misalnya, Filipina tercatat memiliki proporsi nilai tambah manufaktur berteknologi menengah-tinggi sebesar 29.72% dari total nilai tambah manufaktur pada Tahun 1992 dan sebesar 41.78% pada Tahun 2021. Berbeda dengan di Kawasan ASEAN, negara-negara *low-middle income* di Kawasan SAARC memiliki proporsi nilai tambah manufaktur berteknologi menengah-tinggi yang cenderung menurun, seperti Bangladesh, Pakistan, dan Sri Lanka. Proporsi nilai tambah manufaktur Bangladesh awalnya sebesar 22.64% pada Tahun 1992 menjadi 7.81% di Tahun 2021. Hal ini menandai adanya kesenjangan penggunaan teknologi menengah-tinggi dalam sektor manufaktur di kedua kawasan, yang dapat mempengaruhi sektor lain seperti ekonomi dan industri, serta dampaknya terhadap emisi CO₂.

Emisi CO₂ terhadap keberlanjutan lingkungan dalam penelitian ini telah menjadi isu global yang meningkatkan kesadaran negara-negara di dunia untuk berkomitmen dalam upaya mengurangi dampaknya terhadap kelangsungan hidup manusia di bumi (Irma & Gusmira, 2024). Adanya kerja sama antarnegara secara regional dalam menunjang kegiatan ekonomi seperti negara-negara *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan Kawasan SAARC ini berpotensi pada peningkatan emisi CO₂ seiring dengan pertumbuhan ekonomi yang cenderung cepat. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki hubungan antara jejak karbon yang diukur dalam emisi CO₂, konsumsi energi terbarukan, investasi asing langsung, lahan pertanian, dan industri 4.0 di sembilan negara yakni Kamboja, Laos, Myanmar, Filipina, Vietnam, Bangladesh, Nepal, Pakistan, dan Sri Lanka yang merupakan negara dengan kategori *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan Kawasan SAARC pada periode Tahun 1992-2021.

1.2 Rumusan Masalah

Merujuk pada paparan latar belakang, diperoleh rumusan masalah yang menjadi bahasan penelitian ini yaitu:

1. Bagaimanakah konsumsi energi terbarukan, investasi asing langsung, lahan pertanian, dan industri 4.0 berpengaruh terhadap jejak karbon di negara-negara *low-middle income* Kawasan ASEAN dalam jangka panjang?
2. Bagaimanakah konsumsi energi terbarukan, investasi asing langsung, lahan pertanian, dan industri 4.0 berpengaruh terhadap jejak karbon di negara-negara *low-middle income* Kawasan SAARC dalam jangka panjang?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang sudah dijelaskan, tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini yaitu:

1. Untuk mengetahui bagaimana pengaruh jangka panjang antara konsumsi energi terbarukan, investasi asing langsung, lahan pertanian, dan industri 4.0 terhadap jejak karbon di negara-negara *low-middle income* Kawasan ASEAN.
2. Untuk mengetahui bagaimana pengaruh jangka panjang antara konsumsi energi terbarukan, investasi asing langsung, lahan pertanian, dan industri 4.0 terhadap jejak karbon di negara-negara *low-middle income* Kawasan SAARC.

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan penelitian yang sudah dijelaskan, manfaat dari penelitian ini yaitu:

1. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menambah informasi bagi peneliti di masa datang mengenai hubungan antara berbagai aktivitas ekonomi terhadap lingkungan
2. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih dalam tentang hubungan antara ekonomi dan lingkungan sehingga dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam membuat kebijakan nasional dan regional dalam memitigasi jejak karbon di ASEAN dan SAARC

3. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan oleh pemangku kebijakan sebagai bahan evaluasi sejauh mana dinamika ekonomi dan kebijakan lingkungan berinteraksi dalam konteks regional.

II. TINJAUAN PUSTAKA

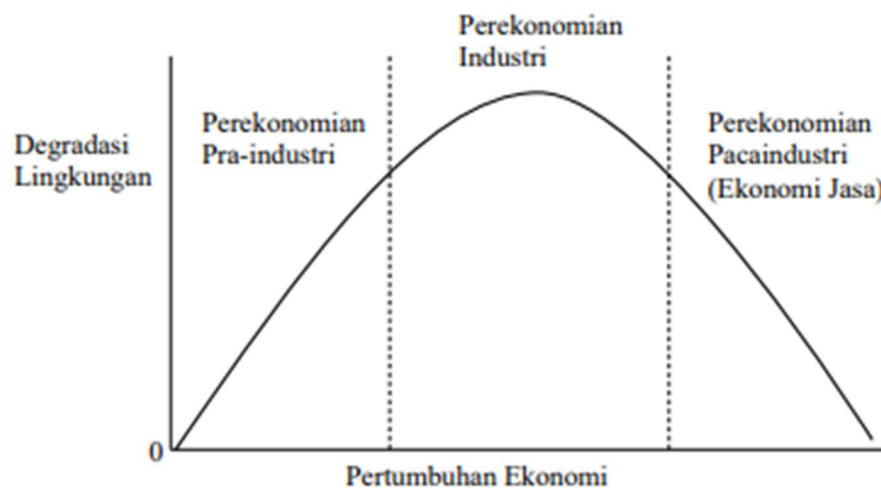
2.1 Kajian Teori

2.1.1 Teori Environmental Kuznet Curve (EKC)

Teori pertama yang menggambarkan hubungan antara pertumbuhan ekonomi dengan degradasi lingkungan dikenal sebagai *Environmental Kuznet Curve*. Menurut hipotesis EKC, hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan mengikuti pola berbentuk kurva-U terbalik (Fodha & Zaghdoud, 2010). Teori EKC ini dikembangkan oleh Grossman & Krueger (1991) yang mengaplikasikan hipotesis pada kurva Kuznet untuk melihat hubungan kualitas lingkungan dengan pertumbuhan ekonomi. Grossman dan Krueger memperkenalkan hipotesis EKC dan menyatakan bahwa kegiatan ekonomi pada awalnya cenderung menghasilkan polusi (Sun et al., 2023). Menurut teori ini, ketika pendapatan negara rendah, negara tersebut akan melakukan berbagai upaya guna meningkatkan pendapatannya tanpa memerhatikan permasalahan lingkungan yang ditimbulkan. Akibatnya, peningkatan pendapatan akan diikuti oleh kenaikan degradasi lingkungan.

EKC dibagi atas tiga tahap, tahap pertama yaitu *pre-industrial economics* (pembangunan ekonomi yang seiring dengan peningkatan kerusakan pada lingkungan), tahap kedua yaitu *industrial economic*, dan tahap ketiga yaitu *post-industrial economics* (Panayotou, 2003). Teori EKC menjelaskan bahwa pertumbuhan ekonomi pada awalnya berjalan seiring dengan meningkatnya degradasi lingkungan. Pada awal tahap pembangunan atau tahap perkembangan ekonomi, suatu negara akan melakukan eksploitasi besar-besaran terhadap sumber daya alam dalam upaya mendorong

bertumbuhan ekonomi. Tahapan ini terjadi sebelum munculnya era industrialisasi di suatu negara atau disebut sebagai tahapan *pre-industrial economic*. Terjadinya pergerakan perekonomian dari industri kecil ke industri besar mengakibatkan peningkatan pada penggunaan sumber daya alam yang pada akhirnya meningkatkan degradasi lingkungan.



Sumber: Panayotou, 2003

Gambar 7 Tahapan dalam Hubungan Pertumbuhan Ekonomi dan Kualitas Lingkungan

Setelah terjadi eksploitasi besar-besaran, negara tersebut akan mencapai tingkat tertentu yang disebut sebagai *Turning Point* (titik balik). Pada titik ini, negara menyadari pentingnya kebutuhan akan kualitas lingkungan yang baik. Hal ini ditandai dengan tingkat pertumbuhan ekonomi yang tidak lagi diikuti oleh degradasi lingkungan. Tahap ini adalah tahapan puncak dalam EKC atau sering disebut sebagai *industrial economic*. Pada tahap ini, struktur ekonomi akan mulai mengalami pergeseran akibat peran pemerintah yang mulai menerapkan regulasi yang ketat sebagai upaya menciptakan perekonomian yang berkelanjutan. Sehingga dalam tahap akhir EKC ini, negara mengalami pergeseran struktur ekonomi dari yang sebelumnya bergerak di bidang industri menjadi negara yang bergerak di bidang jasa.

2.1.2 Teori Schumpeter

Teori pertumbuhan ini berpendapat bahwa faktor utama yang mendorong terjadinya pertumbuhan ekonomi suatu negara adalah inovasi di bidang teknologi yang dilakukan oleh inovator atau wirausaha (Astutiningsih & Sari, 2017). Teori ini menunjukkan bahwa para pengusaha atau inovator terus melakukan pembaharuan dalam kegiatan ekonomi. Dalam teori ini terdapat 5 kegiatan yang dapat dikategorikan sebagai inovasi yaitu:

- a. Memperkenalkan produk baru
- b. Memperkenalkan cara memproduksi baru
- c. Adanya perubahan organisasi industri menuju efisiensi
- d. Penemuan sumber-sumber bahan mentah baru
- e. Penemuan pasar-pasar baru

Inovasi-inovasi ini dapat timbul jika ditunjang oleh beberapa faktor, diantaranya (i) wirausaha yang cukup tersedia dan (ii) keamanan, politik, teknologi, dan lingkungan sosial yang dapat membangkitkan semangat untuk melakukan inovasi.

Dalam teori *creative destructive* oleh Schumpeter mengatakan bahwa economic value yang sebelumnya sudah rusak akan memberikan *net economic benefit* yang lebih tinggi jika dilakukan penginovasian terbaru. Teori Schumpeter dengan konsep *creative destruction* ini dikenalkan oleh Joseph. A Schumpeter. Schumpeter dalam bukunya yang berjudul *Capitalism, Sosialism, and Democracy*, berpendapat bahwa pendorong utama dalam ekonomi adalah ketika terjadi proses inovasi seperti memperkenalkan produk dan teknologi baru yang dilakukan oleh wirausahawan (Bank Dunia, 2024). Konsep *creative destructive* dalam teori ini meliputi proses inovasi yang menggantikan struktur ekonomi lama dengan struktur ekonomi yang baru guna menghasilkan produktivitas dan pertumbuhan ekonomi yang lebih tinggi. Ketika teknologi yang lama kurang efisien, mereka menggantinya dengan menciptakan teknologi dan inovasi baru yang lebih produktif dan efisien. Schumpeter menekankan bahwa inovasi teknologi merupakan salah satu faktor penting yang

mendorong pertumbuhan ekonomi dalam jangka panjang. Inovasi teknologi seperti industri 4.0 dapat meningkatkan efisiensi industri dan menciptakan pasar baru yang ramah lingkungan. Dengan penerapan teknologi ini, sektor-sektor yang masih bergantung pada energi fosil dapat digantikan dengan inovasi berbasis teknologi yang lebih efisien dan lebih ramah lingkungan, di mana hal ini secara langsung akan berdampak pada pengurangan emisi.

2.1.3 Teori *Sustainable Development* (Pembangunan Berkelanjutan)

Konsep *sustainable development* atau pembangunan berkelanjutan adalah suatu prinsip dalam pengorganisasian dunia untuk memenuhi tujuan pembangunan manusia, diiringi dengan upaya mempertahankan kemampuan alam guna menyediakan sumber daya yang menjadi tumpuan ekonomi masyarakat. Konsep *sustainable development* ini berfokus pada bagaimana pertumbuhan ekonomi dan kelestarian lingkungan berjalan beriringan dalam memenuhi kebutuhan. Dalam konsep ini pertumbuhan ekonomi tetap dicapai dengan menekankan pentingnya penciptaan ekonomi yang efisien, inklusif, dan berkelanjutan. Penggagasan konsep *sustainable development* ini dilakukan sebagai bentuk respon atas berbagai dampak kerusakan lingkungan yang ditimbulkan oleh manusia.

Dalam mendorong tercapainya pembangunan berkelanjutan, saat ini Persatuan Bangsa-Bangsa (PBB) sedang menjalankan program *The Sustainable Development Goals* (SDGs) yang merupakan program pengganti dari *Millenium Development Goals* (MDGs). MDGs merupakan program yang disetujui oleh 189 negara anggota PBB pada bulan September 2000 sebagai komitmen untuk mencapai tujuan pembangunan manusia pada Tahun 2015 (Todaro & Smith, 2009). MDGs berisi 8 tujuan dan sasaran pembangunan yang terdiri dari:

- 1) Mengurangi kemiskinan dan kelaparan ekstrem
- 2) Mencapai pendidikan dasar universal
- 3) Meningkatkan kesetaraan gender dan pemberdayaan perempuan
- 4) Mengurangi tingkat mortalitas anak-anak

- 5) Meningkatkan kesehatan ibu
- 6) Memerangi HIV/AIDS, malaria, dan penyakit lainnya
- 7) Menjaga kelestarian lingkungan hidup
- 8) Membina kerja sama global bagi pembangunan

Kemudian program SDGs disepakati pada 2012 dalam *United Nations Conference on Sustainable Development* (UNCSD) sebagai peringatan 20 tahun *United Nations Conference on Environment and Development* (UNCED). Dalam konferensi ini disepakati bahwa konsep SDGs berada di bawah resolusi “*The Future We Want*”. Setelah itu, PBB mulai memproses konsep ini agar menjadi konsep pembangunan yang dilaksanakan oleh 193 negara anggotanya. Berdasarkan United Nations, SDGs terdiri dari 17 target, yakni sebagai berikut:

- 1) Tanpa kemiskinan
- 2) Tanpa kelaparan
- 3) Kehidupan sehat dan sejahtera
- 4) Pendidikan berkualitas
- 5) Kesetaraan gender
- 6) Air bersih dan sanitasi layak
- 7) Energi bersih dan terjangkau
- 8) Pekerjaan layak dan pertumbuhan ekonomi
- 9) Industri, inovasi, dan infrastruktur
- 10) Berkurangnya kesenjangan
- 11) Kota dan komunitas berkelanjutan
- 12) Konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab
- 13) Penganganan perubahan iklim
- 14) Ekosistem laut
- 15) Ekosistem daratan
- 16) Perdamaian, keadilan, dan kelembagaan yang tangguh
- 17) Kemitraan untuk mencapai tujuan

Penelitian ini menggunakan target no 13 yaitu penanganan iklim sebagai salah satu landasan penelitian. Perubahan iklim ini terjadi didorong oleh pemanasan global yang disebabkan peningkatan Gas Rumah Kaca (GRK). Peningkatan GRK ini telah menimbulkan dampak signifikan dalam setiap sektor kehidupan masyarakat. Beberapa ahli mengungkapkan bahwa antara lingkungan dan ekonomi memiliki hubungan *trade off*. Artinya, ketika terjadi peningkatan pertumbuhan ekonomi, kerusakan lingkungan juga semakin meningkat sebagai akibat dari kelangkaan sumber daya alam dan degradasi lingkungan (Rahayu et al., 2024)

2.1.4 Jejak Karbon (Carbon Footprint)

Istilah jejak karbon berasal dari konsep jejak ekologis, jejak ekologis ini pada hakikatnya adalah perhitungan siklus hidup secara penuh. Jejak ekologis menggambarkan total luas lahan yang dibutuhkan untuk menghasilkan konsumsi manusia pada tingkat tertentu (Matthews et al., 2008). Secara umum, jejak karbon berfokus pada proses dan kegiatan yang berkaitan dengan emisi CO₂ (dan gas rumah kaca lainnya). Sedangkan, dalam jejak ekologis dampak akibat tindakan manusia yang dirasakan lebih luas. Selain itu, meskipun jejak ekologis merupakan ukuran yang dinyatakan dalam luas lahan produktif, jejak karbon sebagian besar mengukur kuantitas fisik karbon (East & Growcom, 2008).

Jejak karbon ini sendiri merupakan ukuran sejumlah emisi gas rumah kaca yang berhubungan langsung dengan produksi atau aktivitas manusia yang relevan dengan perubahan iklim (Gan et al., 2011). Jejak karbon dapat didefinisikan sebagai ukuran keseluruhan emisi CO₂ yang disebabkan secara langsung atau tidak langsung melalui akumulasi aktivitas suatu produk (Wiedmann & Minx, 2007). Jejak karbon merujuk pada pengukuran emisi gas rumah kaca, yang biasanya dinyatakan dalam ekuivalen karbon dioksida. Emisi gas rumah kaca ini dilepaskan ke atmosfer baik secara langsung maupun tidak langsung melalui berbagai aktivitas, proses, atau produk (Yurtay, 2025). Jejak karbon biasanya dihasilkan oleh pribadi,

produksi, organisasi, atau sebuah wilayah. Jejak karbon secara pribadi merupakan jenis jejak karbon yang dihasilkan oleh makanan, pakaian, dan perjalanan sehari-hari seseorang. Jejak karbon produksi dihasilkan oleh produk atau jasa, mulai dari produksi sampai dengan penggunaan, serta daur ulang atau pembuangan produk tersebut. Jejak karbon organisasi merupakan ukuran dari emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari semua aktivitas organisasi, termasuk proses industri dan energi yang digunakan dalam bangunan. Sementara itu, jejak karbon suatu wilayah berfokus pada emisi CO₂ yang dihasilkan dari seluruh aktivitas ekonomi, termasuk penggunaan energi, serta aktivitas ekspor dan impor di wilayah tersebut.

Penelitian ini menggunakan emisi CO₂ sebagai proksi dari jejak karbon. Beberapa penelitian seperti oleh Durojaye et al., (2020) dan Wiedmann & Minx, (2007) menyebutkan bahwa jejak karbon sebagai ukuran emisi CO₂ yang secara langsung maupun tidak langsung dihasilkan dari berbagai aktivitas manusia. Sehingga, meneliti bagaimana dampak emisi CO₂ dapat merepresentasikan jejak karbon yang menjadi variabel dependen dalam penelitian ini.

2.1.5 Sumber Energi

Energi yang merupakan bagian dari sumber daya alam, menjadi salah satu kebutuhan penting dalam kehidupan manusia. Hampir seluruh kegiatan manusia di bumi memerlukan energi, karena itu sektor energi memiliki kontribusi yang besar dalam perekonomian (Mathur et al., 2022). Energi menjadi sumber pemenuhan kebutuhan manusia akan bahan bakar yang diperuntukkan dalam sektor industri, transportasi, maupun di rumah tangga. Pengambilan sumber daya alam secara terus menerus sebagai upaya memenuhi kebutuhan akan energi membuat semakin menipisnya sumber daya alam yang tersedia. Pemanfaatan energi secara berlebihan, terutama energi fosil, menjadi penyebab utama terjadinya perubahan iklim secara global (Suparmoko, 2013).

Istilah energi telah mencakup semua bentuk, termasuk sumber energi terbarukan dan sumber tidak terbarukan (Marthur et al., 2022).

- a. Energi terbarukan: Sebuah sumber energi yang dapat diperbaharui ketika sudah habis. Energi terbarukan dapat dimanfaatkan dengan bebas karena memiliki ketersediaan yang tidak terbatas. Contoh dari energi terbarukan adalah angin, panas bumi, matahari, biomassa, dan air pasang laut.
- b. Energi tak terbarukan: Sumber energi yang tidak dapat diperbaharui ketika habis sebab ketersediaan energi ini sangat terbatas. Contohnya adalah fosil, semua bahan bakar fosil mengandung karbon. Ketika bahan bakar fosil dibakar, karbon yang dihasilkan akan dilepaskan ke atmosfer sebagai karbon dioksida yang merupakan kontributor terhadap perubahan iklim. Contoh bahan bakar fosil ini yaitu batu bara dan minyak bumi.

Dalam kaitannya dengan emisi CO₂, sektor energi menjadi salah satu penyumbang utama kerusakan lingkungan karena sebagian besar sektor energi bergantung pada bahan bakar fosil. Konsumsi energi secara berlebihan dapat menciptakan masalah lingkungan karena menyebabkan peningkatan emisi CO₂ (Adrian, 2023; Shaari et al., 2020). Penggunaan bahan bakar fosil seperti gas alam, minyak bumi, dan batu bara di semua lini kehidupan manusia, misalnya pada transportasi, pembangkit listrik, atau pada sektor industri akan memicu bertambahnya jumlah emisi gas rumah kaca (Suparmoko, 2013). Oleh karena itu, perlu adanya transisi dari penggunaan energi tak terbarukan ke energi terbarukan sebagai salah satu upaya untuk mengurangi tingkat emisi CO₂ (Sun et al., 2023).

2.1.6 Investasi

Investasi merupakan salah satu komponen penting dalam mendorong pertumbuhan ekonomi. Menurut Sukirno (2000), selain meningkatkan pertumbuhan ekonomi, investasi yang dilakukan oleh masyarakat dapat memperluas kesempatan kerja dan meningkatkan kesejahteraan

masyarakat. Kegiatan investasi memiliki fungsi : a) kenaikan investasi akan meningkatkan permintaan agregat dan pendapatan nasional; b) untuk menambah kapasitas produksi, sebab investasi akan meningkatkan barang modal; serta c) terjadinya perkembangan teknologi seiring dengan masuknya investasi. Sementara itu, menurut Todaro terdapat tiga komponen utama yang mendorong pertumbuhan ekonomi suatu negara yaitu: a) akumulasi modal, termasuk semua jenis investasi yang baru ditanamkan pada peralatan fisik dan sumber daya manusia; b) jumlah tenaga kerja yang meningkat seiring dengan peningkatan jumlah populasi penduduk; dan c) kemajuan teknologi.

Pertumbuhan ekonomi suatu negara tidak hanya bergantung pada investasi dalam negeri atau berasal dari tabungan domestik melainkan juga investasi dipengaruhi oleh investasi yang berasal dari luar negeri (FDI). FDI dalam istilah digunakan untuk menggambarkan investasi yang dilakukan oleh entitas asing dalam proyek atau bisnis domestik (Amoah et al., 2023). Secara umum, investasi asing adalah investasi yang dibuat oleh perusahaan atau individu dari suatu negara yang menjadi kepentingan bisnis yang berlokasi di negara lain (Chiriluş & Costea, 2023). Investasi asing memiliki peranan penting bagi pengembangan perekonomian dalam memperluas lapangan pekerjaan, meningkatkan produksi baik barang maupun jasa, serta mendorong peningkatan nilai tambah suatu produk.

Di samping itu, investasi asing langsung bagi negara tujuan investasi mendatangkan dampak positif seperti masuknya teknologi baru, transfer pengetahuan, serta membuka akses ke pasar-pasar baru baik domestik maupun internasional. Selain dampak positif, investasi asing langsung bagi negara tujuan juga mendatangkan berbagai dampak negatif. Salah satunya adalah dengan masuknya investasi asing langsung, negara *home country* (pemberi investasi) cenderung memindahkan pabrik-pabrik produksi mereka ke negara tujuan yang lebih longgar akan pengawasan lingkungannya (Wang & Liu, 2022). Akibatnya timbul kerusakan

lingkungan yang seiring dengan meningkatnya pabrik-pabrik yang berpolusi tinggi.

Hubungan antara jejak karbon yang diukur oleh emisi CO₂ dengan investasi asing langsung dapat dijelaskan melalui Pollution Haven Hypothesis (PHH). Teori ini menyatakan bahwa arus modal asing langsung (FDI) menuju negara-negara berkembang didorong oleh adanya peluang untuk menghindari regulasi lingkungan yang ketat di negara asal perusahaan (Levinson & Taylor, 2008). Dengan demikian, negara-negara berkembang sering kali menjadi tujuan investasi bagi industri yang menghasilkan polusi tinggi (Sun et al., 2023). Kerja sama yang dilakukan demi memenuhi kebutuhan suatu negara seiring dengan masuknya FDI menjadi alasan adanya peningkatan pada sektor industri yang tidak berkelanjutan, seperti pertambangan, energi fosil, atau manufaktur berat yang mendorong peningkatan aktivitas industri yang berkontribusi besar terhadap emisi CO₂. Oleh sebab itu, walaupun FDI dapat memberikan keuntungan ekonomi, tanpa pengelolaan dan pengawasan yang tepat, investasi ini juga dapat menjadi penyebab utama meningkatnya emisi CO₂ yang dapat memperburuk tantangan lingkungan secara global (Tashim & Rudatin, 2023).

2.1.7 Lahan Pertanian

Secara umum, lahan pertanian didefinisikan sebagai semua bentuk lahan yang digunakan untuk kegiatan produksi pertanian, termasuk tanaman pangan, hortikultura, perkebunan, padang rumput, dan lahan yang diperuntukkan untuk kegiatan peternakan. Lahan pertanian mencakup area yang diklasifikasikan oleh FAO sebagai lahan yang digunakan untuk tanaman sementara, padang rumput sementara yang ditujukan untuk pemotongan rumput, lahan yang ditujukan untuk kebun dapur, dan lahan yang dibiarkan terlantar sementara. Sektor pertanian merupakan bagian dari aktivitas manusia yang menyebabkan hilangnya lahan hutan, yang mendorong terjadinya deforestasi (Pacheco et al., 2021). Oleh sebab itu,

mengurangi deforestasi juga secara langsung dapat mengurangi penggunaan lahan pertanian konvensional dalam rangka menanggulangi krisis iklim yang terjadi, sebab hutan menjadi penghasil maupun penerima karbon. Hutan menyerap karbon dioksida diudara ketika tumbuh dan mengeluarkan karbon ketika ditebang atau terdegradasi (Global Forest Watch, 2024).

Sektor pertanian merupakan salah satu sektor paling penting dan krusial dalam pembangunan berkelanjutan dan kelangsungan hidup masyarakat dalam suatu negara (Kapçak & İşleyen, 2024). Definisi ini menekankan bahwa fungsi lahan pertanian tidak hanya untuk memenuhi kebutuhan ekonomi, tetapi juga menjaga keseimbangan lingkungan. Sektor pertanian menjadi sumber utama ketahanan pangan suatu negara (Mathur et al., 2022) yang juga sebagai salah satu penghasil utama emisi CO₂, yang memproduksi sekitar 20% dari emisi CO₂ secara global (Lu et al., 2018). Sektor pertanian ini memanfaatkan sumber energi terbarukan seperti bahan bakar fosil, listrik, batu bara, dan gas alam untuk mengoperasikan mesin dan peralatan, serta memproduksi pupuk, mesin, dan bahan kimia untuk pencahayaan pada proses pertanian (Kapçak & İşleyen, 2024). Aktivitas-aktivitas ini sangat berkontribusi terhadap peningkatan emisi CO₂. Selain itu, sebagian besar emisi CO₂ dari produksi pertanian juga umumnya berasal dari insektisida dan irigasi (Raza et al., 2023).

Meminimalkan lahan pertanian konvensional menjadi salah satu upaya dalam mengurangi emisi CO₂. Dengan menerapkan langkah-langkah seperti pencegahan deforestasi, melakukan regenerasi hutan, meningkatkan perawatan tanaman, serta melakukan transisi dengan memanfaatkan energi hijau maka sektor pertanian berpotensi mencapai pengurangan emisi total sebesar 20% pada Tahun 2050 (Raihan, Tanchangya, et al., 2024). Upaya ini bukan hanya untuk melindungi hutan yang ada, namun juga sebagai bentuk dilaksanakannya tata kelola lahan khususnya lahan pertanian yang berkelanjutan, sehingga memperkuat peran pertanian dalam mitigasi terjadinya perubahan iklim (Islam et al., 2017). Sehingga, lahan pertanian

digunakan sebagai salah satu variabel independen dalam pertanian ini sebab pertanian dianggap relevan untuk negara-negara *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan SAARC mengingat bahwa perekonomian di kedua kawasan ini masih didominasi oleh sektor pertanian.

2.1.8 Industri 4.0

Industrialisasi merupakan proses penting dalam produksi. Pada awal industrialisasi, terjadi pergeseran sektor utama perekonomian dari pertanian ke sektor manufaktur berat yang menghasilkan emisi CO₂ sebab tingginya permintaan energi dan kurangnya peralatan hemat energi (Raihan & Tuspekova, 2022b). Konsumsi energi yang tinggi dan tidak berkelanjutan dalam proses industrialisasi ini menimbulkan kekhawatiran masyarakat serta sektor publik akan risiko dan tantangan terhadap lingkungan (McWilliams et al., 2014). Oleh sebab itu, manusia telah mengembangkan berbagai teknologi untuk meningkatkan produksi seiring dengan pelestarian lingkungan (Mathur et al., 2022). Banyak negara mulai beralih dari model pertumbuhan ekonomi tradisional yang menekankan pada sektor manufaktur berat ke sektor industri yang berpusat pada inovasi teknologi (Raihan, Hasan, et al., 2024). Inovasi teknologi dalam sektor industri ini digunakan dalam rangka mengurangi konsumsi energi dan emisi CO₂ yang dihasilkan selama proses produksi (Wang & Liu, 2022). Kemajuan teknologi dalam hal ini ditandai dengan kemunculan industri 4.0.

Industri 4.0 adalah sebuah konsep yang mewakili era baru dalam perkembangan 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; Ślusarczyk, 2018). Industri 4.0 didasarkan pada konsep *Internet of Things* dan *Internet of Services*, yang berarti bahwa setiap objek (komponen, mesin, atau produk) yang dihasilkan mengandung teknologi digital (Kohnová & Salajová, 2023). Industri 4.0

merupakan integrasi teknologi baru dan alat digital di sektor manufaktur yang menerapkan *Cyber-Physical System* (CPS), di mana perangkat keras dan perangkat lunak dalam proses manufaktur saling terhubung untuk menghasilkan output dalam skala besar (Ślusarczyk, 2018). Hal ini menandakan bahwa sektor industri manufaktur tidak lagi hanya tentang produk secara fisik (Elnadi & Abdallah, 2024), namun juga transformasi teknologi yang akan mengubah seluruh lanskap industri manufaktur secara global.

Teknologi industri 4.0 memungkinkan jalur manufaktur, proses bisnis, dan kolaborasi dengan pihak lain tanpa memandang zona waktu, jaringan, dan lokasi, serta aspek lainnya (Javaid et al., 2022). Industri 4.0 mengkombinasi sistem jaringan, *Internet of Things* (IoT), *analysis Big Data*, *Artificial Intelligence* (AI), dan *Cloud Computing* untuk meningkatkan efisiensi dalam proses produksi (Tsai, 2023). Selain meningkatkan efisiensi energi, penggunaan teknologi industri 4.0 berpotensi dalam mengubah sistem industri tradisional menjadi ekosistem berkelanjutan dan meminimalkan dampak lingkungan (Yurtay, 2025). Hal ini sesuai dengan penelitian oleh Bai et al., (2020) yang menyebutkan bahwa teknologi industri 4.0 dapat mengurangi konsumsi energi dan emisi CO₂ yang berasal dari sektor industri manufaktur ini.

Penelitian 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. Sejalan dengan temuan oleh (Salonitis, 2023), yang menegaskan bahwa implementasi teknologi pendukung industri 4.0 (IoT, *Industry Cyber-Physical Systems* (ICPS), dan *machine learning*) dapat meningkatkan efisiensi energi serta kinerja operasional sektor manufaktur. Selain itu, sistem *IoT-enable smart manufacturing* yang mengintegrasikan sensor dan *cloud computing* menunjukkan hasil signifikan dalam menurunkan konsumsi energi terbarukan dan *downtime* mesin, serta meningkatkan

efisiensi penggunaan sumber daya (Alex & Johnson, 2025). Dengan demikian, penggunaan data proporsi nilai tambah manufaktur berteknologi menengah-tinggi terhadap nilai tambah dari total manufaktur dianggap relevan sebagai proksi karena mampu merepresentasikan transformasi industri tradisional menuju sistem manufaktur yang lebih efisien dan berkelanjutan.

2.2 Kajian Empiris

Kajian empiris merupakan hasil penelitian terdahulu yang merupakan kajian terhadap penelitian yang telah ada untuk dijadikan referensi dalam penelitian ini. Uraian hasil penelitian terdahulu yang dijadikan sebagai referensi disajikan dalam tabel sebagai berikut:

Tabel 1 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti/Judul	Alat Analisis	Variabel	Hasil
1.	Zhongsheng He, Jing Li, Bakhtawer Ayub (2024) Judul: <i>How Do Income Inequality, poverty and Industry 4.0 Affect Environmental Pollution in South Asia: New Insights from Quantile Regression</i>	Analisis <i>Dynamic Panel Quantile Regression</i> dengan Teknik <i>Bootstrap Quantile Regression (BQR)</i>	Variabel Dependen: <i>Ecological footprint</i> Variabel Independen: 1. <i>Population</i> 2. <i>Income inequality</i> 3. <i>Poverty</i> 4. <i>Economic growth</i> 5. <i>Industry 4.0</i> 6. <i>Social globalization</i>	Hasil penelitian menemukan bahwa ketimpangan pendapatan dan kemiskinan berkontribusi signifikan terhadap degradasi ekologi, dengan meningkatnya jejak ekologi dan emisi CO2 di Kawasan Asia Selatan. Selain itu, ditemukan bahwa aktivitas industri dan globalisasi sosial juga dapat secara signifikan mempengaruhi ekologi di Asia Selatan.
2.	Arsalan Tanveer,	Analisis Data Panel Pedekatan <i>Autoregressive</i>	Variabel endogen yang terpisah	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa deforestasi berpengaruh

No	Peneliti/Judul	Alat Analisis	Variabel	Hasil
	Huaming Song (2024) Judul: <i>Caring for the Environment. How fo Deforestation, Agricultural Land, and Urbanization degrade the Environment? Fresh Insight Through The ARDL Approach</i>	<i>Distributive Lag (ARDL)</i>	(indikator lingkungan) Variabel Independen: 1. <i>Deforestation</i> 2. <i>Agriculture land</i> 3. <i>Urbanization</i> 4. <i>GDP</i> 5. <i>Globalization</i>	secara positif dan signifikan terhadap CO₂, CH₄, dan <i>ecological footprint</i> dalam jangka pendek dan jangka panjang di Pakistan. <i>Agriculture land</i> menentukan hubungan positif dengan CO₂, CH₄, dan <i>ecological footprint</i> dalam jangka panjang di Pakistan. Sedangkan, N₂O memiliki hubungan negatif dengan <i>agricultural land</i> dalam jangka panjang. <i>Urbanization</i> di Pakistan memberikan hasil positif untuk CO₂, CH₄, N₂O, dan <i>ecological footprint</i> dalam jangka pendek dan jangka panjang. Sementara itu, GDP memiliki hubungan positif dengan CO₂, CH₄, N₂O, dan <i>ecological footprint</i> dalam jangka pendek dan jangka panjang di Pakistan.
3.	Asif Raihan, Tipon Tanchangya, Junaid Rahman dan Mohammad Ridwan (2024) Judul:	Analisis Data Time Series: <i>Autoregressive Distributed lag (ARDL)</i>	Variabel Dependen : <i>CO₂ Emissions</i> Variabel Independen: 1. <i>Agriculture value added</i>	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa <i>agriculture</i> dan <i>trade openness</i> memiliki hubungan positif terhadap <i>CO₂ emission</i> dalam jangka panjang di India. Selain itu, <i>renewable energy</i>

No	Peneliti/Judul	Alat Analisis	Variabel	Hasil
	<i>The Influence of Agriculture, Renewable Energy, International Trade, and Economic Growth on India's Environmental Sustainability</i>		2. <i>Renewable energy</i> 3. <i>Economic growth</i> 4. <i>Trade openness</i>	<i>consumption</i> memiliki dampak negatif terhadap <i>CO2 emission</i> . Sedangkan <i>economic growth</i> juga berkontribusi pada penurunan kecil emisi dalam jangka panjang di India.
4.	Muhammad Adi Adrian (2023) Judul: Analisis Pengaruh Aktivitas Ekonomi terhadap Peningkatan Emisi CO2: Studi Empiris Empat Negara ASEAN	Analisis Regresi Data Panel dengan <i>Fixed Effect Model (FEM)</i>	Variabel Dependen: Emisi CO2 Variabel Independen: 1. PDB atas dasar harga berlaku 2. Jumlah penduduk 3. Deforestasi 4. Konsumsi Energi	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi (PDB) dan konsumsi energi di empat negara ASEAN berpengaruh secara signifikan terhadap emisi CO2, sedangkan jumlah penduduk dan deforestasi tidak berpengaruh secara signifikan terhadap emisi CO2
5.	Yanlei Sun, Raad Mahmoud al-Tal, Abu Bakkar Siddik, Samiha Khan, Muntasir Murshed, Rafael Alvarado (2023) Judul: <i>The Non-linearity</i>	Estimasi Regresi <i>Autoregressive Distributed Lag (CS-ARDL)</i>	Variabel Dependen: <i>Carbon footprint</i> Variabel Independen: 1. <i>Financial development</i> 2. <i>Tecnological innovation</i> 3. <i>Renewable energy use</i> 4. <i>Foreign direct investment</i>	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa secara jangka panjang, <i>financial development</i> memiliki dampak berbentuk U terbalik pada angka <i>carbon footprint</i> di negara-negara Asia Selatan. Artinya hipotesis EKC dianggap valid untuk periode jangka panjang. Selain itu, <i>tecnological innovation</i> memberikan efek penghambat

No	Peneliti/Judul	Alat Analisis	Variabel	Hasil
	<i>Financial Development and Carbon Footprint: The Roles of Technological Innovation, Renewable Energy, and Foreign Direct Investment</i>			terhadap <i>carbon footprint</i> dan <i>renewable energy use</i> terbukti mengendalikan <i>carbon footprint</i> hanya dalam jangka panjang. Sementara itu, <i>foreign direct investment</i> tervalidasi dapat mengurangi <i>carbon footprint</i> dalam jangka panjang dan jangka pendek seiring dengan masuknya PHH
6.	Tsaqifu Mu Tashim & Ari Rudatin (2023) Judul: Analisis Ekonomi Negara BRICS terhadap Emisi CO2 (CO2)	Analisis Data Panel	Variabel Dependen: Emisi CO2 (CO2) Variabel Independen: 1. GDP 2. FDI 3. Populasi penduduk 4. <i>Forest Area</i> 5. <i>Energy use</i>	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variabel GDP, FDI, dan <i>energy use</i> masing-masing berpengaruh secara positif terhadap emisi CO2 di lima Negara BRICS, sedangkan variabel <i>forest area</i> berpengaruh negatif. Sementara itu, variabel populasi penduduk tidak mempengaruhi emisi CO2 secara signifikan
7.	Daniel Balsalobre-Lorente, Clara Contente dos Santos Parente, Nuno Carlos Leitao, dan Jose Maria Cantos-Cantos (2023)	Analisis Panel <i>Fully Modified Ordinary Least Square (FMOLS) dan Dynamic Ordinary Least Square (DOLS)</i>	Variabel Dependen: <i>CO2 emission</i> Variabel Independen: 1. <i>Economic Complexity Index</i>	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Kurva Kuznet terpenuhi, di mana berkontribusi positif tetapi menurun dari pembangunan ekonomi. Studi ini juga membuktikan bahwa <i>industry 4.0</i> dapat

No	Peneliti/Judul	Alat Analisis	Variabel	Hasil
	Judul: <i>The Influence of Economic Complexity Processes and Renewable Energy on CO2 Emissions of BRICS. What About Industry 4.0?</i>		2. <i>Renewable energy</i> 3. <i>FDI</i> 4. <i>Industry 4.0</i>	mengurangi emisi dalam jangka panjang di negara-negara BRICS
8.	Pham Xuan Hoa, Vu Ngoc Huan, dan Nguyen Thi Phuong Thu (2023) Judul: <i>Nexus of Innovation, Renewable Consumption, FDI, Growth and CO2 Emissions: The Case of Vietnam</i>	Analisis Data Panel	Variabel Dependen: <i>CO2 emission</i> Variabel Independen: 1. <i>Innovation</i> 2. <i>Renewable energy consumption</i> 3. <i>FDI inflows</i> 4. <i>Economic growth</i>	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa <i>innovation</i> berdampak positif terhadap pencemaran lingkungan di Vietnam. Namun, <i>renewable energy consumption</i> memiliki efek negatif terhadap pencemaran lingkungan. Selain itu, <i>FDI inflow</i> dan <i>economic growth</i> memiliki efek positif yang kuat terhadap pencemaran lingkungan di Vietnam
9.	Asid Raihan dan Almagul Tuspekova (2022) Judul: <i>Dynamic Impact of Economic Growth, Renewable Energy Use,</i>	<i>The Dynamic Ordinary Least Square (DOLS) Approach of Cointegration</i>	Variabel Dependen: <i>CO2 emissions</i> Variabel Independen; 1. <i>Economic growth</i> 2. <i>Renewable energy use</i> 3. <i>Urbanization</i>	Hasilnya penelitian ini menunjukkan bahwa <i>economic growth</i> , <i>urbanization</i> , <i>industrialization</i> , dan <i>tourism</i> memiliki hubungan positif dengan <i>carbon emission</i> di Turkey. Sedangkan, <i>renewable energy use</i> , <i>agriculture</i>

No	Peneliti/Judul	Alat Analisis	Variabel	Hasil
	<i>Urbanization, Industrialization, Tourism, Agriculture, and Forest on Carbon Emission in Turkey</i>		4. <i>Industrialization</i> 5. <i>Tourism</i> 6. <i>Agricultural productivity</i> 7. <i>Forest area</i>	<i>productivity, dan forest area</i> dapat mengurangi carbon emission di Turkey.
10.	Heru Wahyudi, Suropto, dan Widia Anggi Palupi (2022) Judul: <i>Long-Term Implications of Economic Complexity and Energy Intensity on the Environment in Low-Middle-Income Countries in Asia</i>	Analisis Data Panel: <i>Fully Modified Ordinary Least Square (FMOLS) Approach</i>	Variabel Dependensi : <i>Carbon dioxide</i> Variabel Independen: 1. <i>FDI</i> 2. <i>Population</i> 3. <i>Economic Complexity index</i> 4. <i>Energy intensity</i>	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa FDI, <i>population, economic complexity, dan energy intensity</i> dapat meningkatkan jumlah CO2 dalam jangka panjang di negara-negara <i>low-middle income</i> di Asia

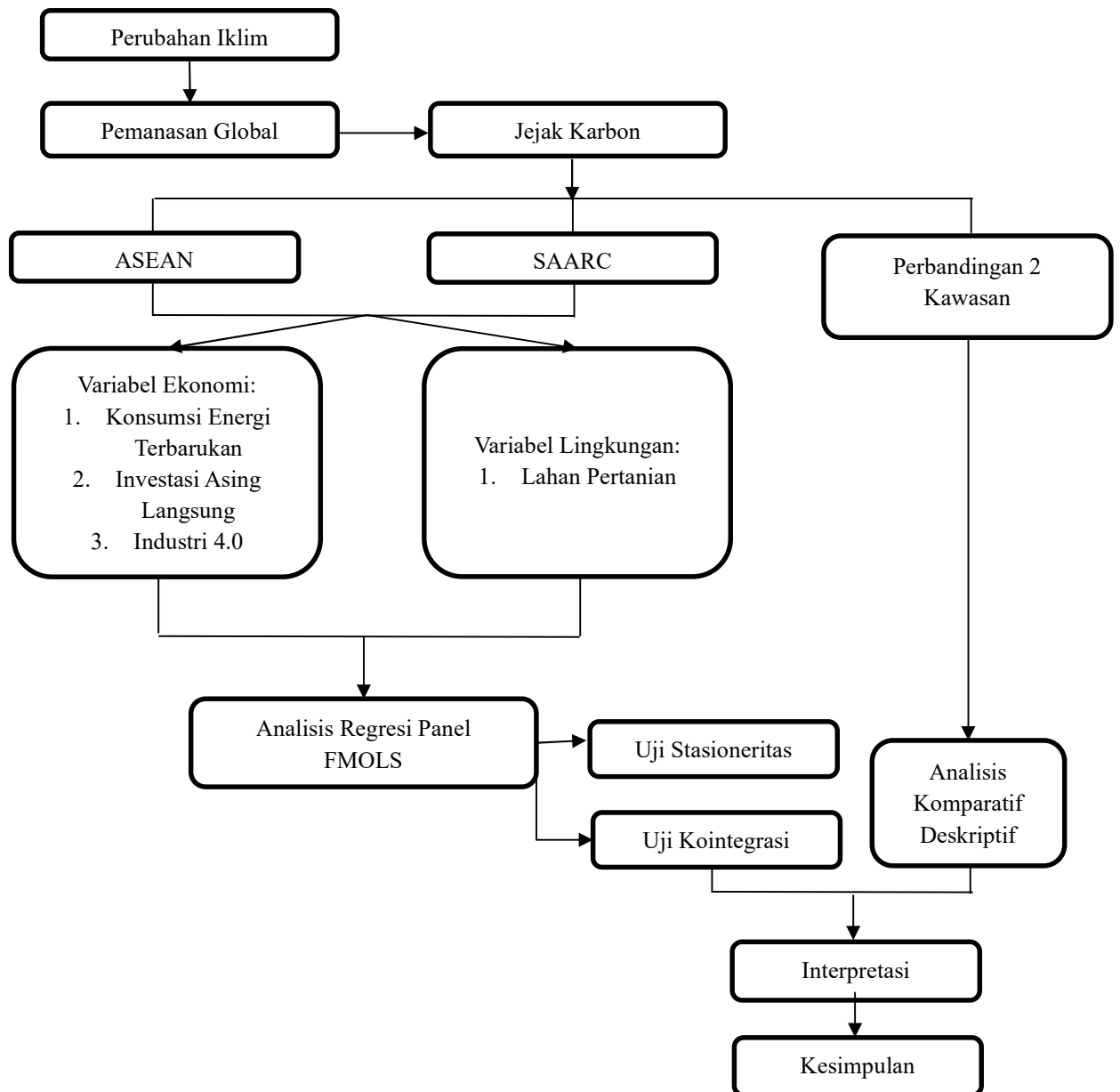
Sumber: Diolah penulis (2024)

2.3 Kerangka Pemikiran

Perubahan iklim beberapa tahun ke belakang ini telah menjadi tantangan secara global. Salah satu fenomena yang mendorong terjadinya perubahan iklim adalah terjadinya peningkatan suhu di bumi atau pemanasan global. Pemanasan global terjadi ketika bertambahnya konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Hal ini seiring dengan meningkatnya berbagai aktivitas manusia yang menghasilkan gas rumah kaca, khususnya karbon dioksida, seperti kegiatan manufaktur, industri, dan pertambangan (Gan et al., 2011). Perubahan iklim menimbulkan dampak dan risiko yang melebihi batas adaptasi lingkungan serta mengakibatkan kerugian dan kerusakan. Perubahan iklim yang terjadi dapat berdampak langsung pada kesehatan manusia, mata pencaharian masyarakat

yang bergantung pada sumber daya, struktur hutan, fungsi ekosistem, dan ketahanan pangan.

Permasalahan mengenai isu global seperti pemanasan global dan efek gas rumah kaca ini sudah menjadi perhatian khusus seluruh negara di dunia (Wahyudi et al., 2024). Berbagai negara di dunia berkomitmen dalam mengurangi dampak pemanasan global terhadap kelangsungan hidup manusia (Irma & Gusmira, 2024). Tak terkecuali bagi negara-negara yang termasuk dalam kategori *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan Kawasan SAARC. Negara-negara ini berupaya dalam rangka mengurangi dampak emisi CO₂ sesuai dengan perjanjian Paris yaitu menuju *fase zero-carbon country*. Komitmen ini diwujudkan melalui berbagai kebijakan dan strategi dalam upaya menurunkan jejak karbon. Jejak karbon mencakup emisi yang berasal dari berbagai sektor, seperti sektor industri, manufaktur, dan transportasi. Jejak karbon dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik dari faktor ekonomi seperti konsumsi energi, investasi asing, dan industri 4.0, maupun dari faktor lingkungan yaitu perubahan penggunaan lahan, termasuk lahan pertanian. Berdasarkan uraian di atas, dapat digambarkan kerangka pemikiran dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Sumber: Diolah penulis (2024)

Gambar 8 Kerangka Pemikiran

2.4 Hipotesis

Hipotesis yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Hipotesis di Kawasan ASEAN
 - a. Diduga terdapat hubungan jangka panjang antara konsumsi energi terbarukan, investasi asing langsung, lahan pertanian, dan industri 4.0 terhadap jejak karbon di negara-negara *low-middle income*.
 - b. Diduga pengaruh variabel-variabel independen secara parsial:
 - 1) Konsumsi energi terbarukan diduga berpengaruh negatif dan signifikan terhadap jejak karbon
 - 2) Investasi asing langsung diduga berpengaruh positif dan signifikan terhadap jejak karbon
 - 3) Lahan pertanian diduga berpengaruh positif dan signifikan terhadap jejak karbon
 - 4) Industri 4.0 diduga berpengaruh negatif dan signifikan terhadap jejak karbon
2. Hipotesis di Kawasan SAARC
 - a. Diduga terdapat hubungan jangka panjang antara konsumsi energi terbarukan, investasi asing langsung, lahan pertanian, dan industri 4.0 terhadap jejak karbon di negara-negara *low-middle income*.
 - b. Diduga pengaruh variabel-variabel independen secara parsial:
 - 1) Konsumsi energi terbarukan diduga berpengaruh negatif dan signifikan terhadap jejak karbon
 - 2) Investasi asing langsung diduga berpengaruh positif dan signifikan terhadap jejak karbon
 - 3) Lahan pertanian diduga berpengaruh positif dan signifikan terhadap jejak karbon
 - 4) Industri 4.0 diduga berpengaruh negatif dan signifikan terhadap jejak karbon

III. METODE PENELITIAN

3.1 Jenis dan Sumber Data

3.1.1 Jenis Penelitian

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan kuantitatif. Penelitian kuantitatif adalah penelitian yang sifatnya dapat simpulkan atau pengambilan kesimpulan berdasarkan hasil pengujian hipotesis secara statistik (Djaali, 2021). Penelitian kuantitatif merupakan metode penelitian yang menghasilkan temuan baru dengan menggunakan prosedur-prosedur statistik. Dalam penelitian kuantitatif, data-data yang digunakan merupakan sebuah data yang dapat dihitung dan dianalisis dalam bentuk numerik (Aliasuddin et al., 2022). Sehingga penelitian ini difokuskan menggunakan pendekatan kuantitatif yang melibatkan data-data dalam bentuk angka untuk mengidentifikasi hubungan antar variabel dengan metode statistik guna menginterpretasikan hasil temuan dalam penelitian. Penelitian ini dirancang agar dapat memberikan gambaran mengenai pengaruh konsumsi energi terbarukan, investasi asing langsung, lahan pertanian, dan industri 4.0 terhadap jejak karbon di Kawasan ASEAN dan SAARC dan gambaran mengenai perbedaan pengaruh variabel-variabel yang diteliti di dua kawasan tersebut.

3.1.2 Sumber Data

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder. Data sekunder ini merupakan data yang diperoleh secara tidak langsung seperti dari studi pustaka, buku, artikel, ataupun data yang telah disusun oleh instansi tertentu yang dapat dipertanggungjawabkan. Penelitian ini menggunakan data yang berasal dari *Global Carbon Budget* dan *World*

Development Indicators. Data yang digunakan dalam penelitian ini data panel. Data panel adalah data gabungan antara data *cross section* dan data *time series*. Data panel dalam penelitian ini mencakup *cross-section* 9 negara dan *time series* 30 tahun. Pemilihan negara-negara yang menjadi objek dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan klasifikasi pendapatan oleh Bank Dunia yang termasuk negara dalam kategori *low-middle income*. Negara-negara di Kawasan ASEAN yang diteliti yaitu Kamboja, Laos, Myanmar, Filipina, dan Vietnam serta di Kawasan SAARC yaitu Bangladesh, Nepal, Pakistan dan Sri Lanka mulai dari Tahun 1992 hingga Tahun 2021.

Penelitian ini menggunakan satu variabel terikat (dependen) dan empat variabel tidak terikat (independen). Variabel dependen yang digunakan dalam penelitian ini adalah jejak karbon yang diproksikan dalam emisi CO₂. Penelitian ini menggunakan emisi CO₂ sebagai proksi untuk variabel jejak karbon dikarenakan emisi CO₂, khususnya CO₂ merupakan salah satu komponen utama dari jejak karbon. CO₂ menjadi komponen dalam gas rumah kaca yang paling signifikan mempengaruhi perubahan iklim, maka perhitungan jejak karbon dalam penelitian ini difokuskan pada emisi CO₂. Variabel independen yang digunakan dalam penelitian ini adalah konsumsi energi terbarukan, investasi asing langsung, lahan pertanian, dan industri 4.0.

Tabel 2 Variabel, Simbol, dan Sumber Data

Variabel	Simbol	Sumber data
Jejak Karbon	CF	Global Carbon Budget
Konsumsi Energi Terbarukan	REC	World Development Indicators
Investasi Asing Langsung	FDI	World Development Indicators
Lahan Pertanian	AL	World Development Indicators
Industri 4.0	IDS	World Development Indicators

Sumber: Diolah penulis (2024)

3.2 Definisi Operasional Variabel

Berdasarkan pada masalah dan hipotesis yang akan diuji maka variabel-variabel yang akan diteliti dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3 Definisi Operasional Variabel

No	Variabel	Deskripsi	Pengukuran	Skala
1.	Jejak Karbon	Pengukuran dari total emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari aktivitas manusia. Variabel jejak karbon diproksikan oleh emisi CO ₂ karena emisi CO ₂ menjadi salah satu komponen penting dalam jejak karbon yang secara signifikan mempengaruhi perubahan iklim.	Juta ton	Rasio
2.	Konsumsi Energi Terbarukan	Konsumsi energi dari semua sumber daya terbarukan seperti hidro, angin, surya, panas bumi, biogas, biofuel padat, biofuel cair, laut dan limbah. Konsumsi energi terbarukan diukur dari proporsi konsumsi energi terbarukan terhadap total konsumsi energi secara keseluruhan.	(%)	Rasio
3.	Investasi Asing Langsung	Arus masuk bersih investasi dalam sebuah perusahaan guna mendapatkan keuntungan dalam manajemen secara berkelanjutan. Investasi asing langsung diukur	(%)	Rasio

No	Variabel	Deskripsi	Pengukuran	Skala
		dari proporsi arus masuk bersih terhadap PDB.		
4.	Lahan Pertanian	Lahan pertanian mencakup area yang diklasifikasikan oleh FAO sebagai lahan yang digunakan untuk tanaman sementara, padang rumput sementara yang ditujukan untuk pemotongan rumput, lahan yang ditujukan untuk kebun dapur, dan lahan yang dibiarkan telantar sementara. Lahan pertanian diukur dari proporsi lahan pertanian terhadap total lahan.	(%)	Rasio
5.	Industri 4.0	Industri 4.0 diproksikan oleh nilai tambah manufaktur berteknologi menengah dan tinggi yang diukur dari proporsi nilai tambah manufaktur teknologi menengah dan tinggi terhadap total nilai tambah sektor manufaktur	(%)	Rasio

Sumber: Diolah penulis (2024)

3.3 Metode Analisis Data

Penelitian ini menggunakan metode analisis data panel guna mengetahui ada atau tidaknya pengaruh antara variabel dependen dengan variabel independen. Metode data panel merupakan gabungan antara data *cross section* dan *time series* yang pertama kali dikenalkan oleh Howles pada Tahun 1950. Data *cross section* adalah data yang dikumpulkan pada suatu periode waktu tertentu

terhadap variabel-variabel penelitian. Sedangkan, data *time series* adalah data yang dikumpulkan dari waktu ke waktu terhadap suatu variabel penelitian. Dengan menggunakan metode data panel ini akan diketahui dua informasi yaitu informasi antar unit (*cross-section*) pada perubahan antar subjek dan informasi antar waktu (*time series*) yang terdapat perubahan subjek waktu. Data panel ini memiliki keunggulan dalam mengidentifikasi dan mengestimasi efek yang tidak dapat terdeteksi jika hanya menggunakan atau *cross-section* murni atau data *time series* murni (Baltagi, 1996). Penggunaan data panel dalam penelitian ini memungkinkan peneliti untuk mempelajari perilaku dinamis yang kompleks karena menggabungkan dimensi waktu dan dimensi individu secara bersamaan.

3.3.1 Uji Stasioneritas

Langkah pertama dalam estimasi panel ini adalah uji stasioneritas guna menentukan apakah semua variabel dalam penelitian terintegrasi dalam ordo yang sama (Liddle, 2012). Uji *unit root* digunakan untuk menentukan stasioneritas variabel dengan *null hypothesis* yaitu terdapat *unit root* (akar unit). Uji *unit root* meneliti tingkat integrasi masing-masing variabel penelitian apakah stasioner di ordo $I(0)$ atau stasioner setelah diferensiasi pada ordo $I(1)$ atau $I(2)$ (Leiwakabessy & Payapo, 2022). Panel *unit root test* ini dilakukan guna memastikan tidak adanya hasil regresi yang semu (*spurious regression*) saat menggunakan data panel (Khan et al., 2019; Zwane et al., 2023). Pada data panel, uji *unit root* yang dilakukan adalah pengembangan dari uji *unit root* pada *time series*. Levin, Lin, dan Chu (Levin et al., 1992), Im, Pesaran, dan Shin (Im et al., 2003), serta *Cross Sectionally Augmented IPS-CIPS* melakukan uji *unit root* pada data panel dengan menggunakan teknik *Augmented Dickey-Fuller* (ADF) yang dimodifikasi.

Hipotesis dalam uji stasioneritas ini adalah sebagai berikut:

H_0 : terdapat *unit root* (data tidak stasioner)

H_a : tidak terdapat *unit root* (data stasioner)

Pengambilan keputusan dilakukan dengan kriteria:

Jika probabilitas ADF *test statistic* $> 0,05$ maka H_0 diterima, artinya variabel tidak stasioner

Jika probabilitas ADF *test statistic* $< 0,05$ maka H_0 ditolak, artinya variabel stasioner

Selain melihat probabilitas test statistik ADF, untuk menentukan apakah data stasioner atau tidak juga dapat dilakukan dengan membandingkan antara nilai statistik ADF dengan nilai kritisnya yaitu distribusi statistik. Jika nilai absolut statistik ADF lebih besar dari nilai kritisnya, maka data yang diamati adalah stasioner. Namun, jika nilai absolut statistik ADF lebih kecil dari nilai kritisnya, maka data tidak stasioner. Ketika uji *unit root* ADF menghasilkan kesimpulan bahwa data tidak stasioner pada level, maka diperlukan proses diferensi data.

3.3.2 Uji Kointegrasi

Dalam data panel, uji kointegrasi dilakukan dengan beberapa teknik. Teknik pengujian yang sering digunakan adalah *Panel Cointegration with Pedroni* (2004) dan *KAO Based* (1999) yang menggunakan kerangka kerja Engle-Granger (Ariefianto & Trinugroho, 2021). Uji Kao memiliki dua tipe pengujian kointegrasi dalam data panel yaitu tipe Dickey-Fuller (DF) dan Augmented Dickey Fuller (ADF) (Baltagi, 2005). Kao (1999) dalam Baltagi (2005) mengusulkan tes kointegrasi Kao ini dengan asumsi bahwa bahwa ADF panel adalah homogen. Sedangkan, uji Pedroni membagi pengujian dalam dua kategori yaitu pengujian dengan menghitung rata-rata statistik kointegrasi dari tiap unit cross-section (*within dimension*), dan pengujian dengan menghitung rata-rata pada bagian pembilang dan penyebut secara terpisah untuk memperoleh distribusi limit yang tepat (*between dimension*) (Baltagi & Kao, 2000). Dalam uji Pedroni, terdapat tujuh statistik uji kointegrasi untuk data panel yaitu Panel v-statistic, Panel rho-statistic, Panel PP-statistic, dan Panel ADF-statistic yang termasuk statistik *within dimension*, serta Group rho-statistic, Group PP-statistic, dan Group ADF-

statistic yang termasuk dalam statistik *between dimension* (Shaari et al., 2024).

Uji kointegrasi dalam panel ini dilakukan untuk melihat apakah terdapat hubungan jangka panjang atau tidak antara setiap variabel yang akan diteliti terutama ketika data tersebut non-stasioner pada level tetapi stasioner pada tingkat *first difference* (Leiwakabessy & Payapo, 2022). Dengan adanya mekanisme hubungan jangka panjang ini diharapkan dapat mengembalikan variabel-variabel yang akan diteliti ke dalam pola hubungan ekuilibrium atau keseimbangan jangka panjangnya. Hipotesis dalam uji kointegrasi ini adalah sebagai berikut:

H_0 : tidak ada kointegrasi (tidak ada hubungan jangka panjang)

H_a : terdapat kointegrasi (ada hubungan jangka panjang)

Kriteria pengambilan keputusan dari pengujian ini adalah sebagai berikut:

Jika nilai probabilitas > 0.05 maka H_0 diterima, tidak ada bukti kointegrasi

Jika nilai probabilitas < 0.05 maka H_0 ditolak, terdapat bukti kointegrasi

Selain melihat *probability value*, ada atau tidaknya kointegrasi dalam persamaan dapat membandingkan antara F-statistik dengan nilai batas atas dan nilai batas bawah. Jika nilai F-statistik hasil perhitungan lebih besar dari nilai batas atas atau $I(1)$ maka terdapat kointegrasi atau hubungan jangka panjang antar variabel. Namun, jika nilai F-statistik hasil perhitungan lebih kecil dari nilai batas bawah atau $I(0)$ maka tidak terdapat kointegrasi antar variabel. Ketika nilai F-statistik berada di antara nilai $I(0)$ dan $I(1)$ maka uji kointegrasi dianggap tidak valid (Sahara & Rahadian, 2023).

3.3.3 Metode Regresi Panel FMOLS

Metode panel Fully Modified Ordinary Least Square (FMOLS) merupakan pengembangan dari metode Ordinary Least Square (OLS) yang dirancang untuk data panel yang bersifat nonstasioner (semua variabel harus stasioner pada *1st difference*) namun memiliki kointegrasi antar variabel (Pattak et

al., 2023). Metode FMOLS dikembangkan oleh Phillips dan Hansan (1990) untuk mengatasi kelemahan dari OLS biasa, terutama dalam menghadapi permasalahan endogenitas variabel independen dan autokorelasi dalam *error term* (Kao & Chiang, 1999). Metode FMOLS bertujuan untuk menghasilkan estimasi parameter regresi yang konsisten dan tidak bias secara asimtotik, serta menghasilkan distribusi normal bebas parameter gangguan (Pedroni, 1999). Dengan ini, penggunaan panel FMOLS dapat meningkatkan akurasi estimasi kointegrasi jangka panjang yang tidak terpengaruh oleh tingkat heterogenitas jangka pendek yang cukup besar dalam data panel (Leiwakabessy & Payapo, 2022; Pedroni, 1999).

Bentuk persamaan umum untuk model panel FMOLS adalah :

$$Y_{it} = \alpha_i + \beta X_{it} + \varepsilon_{it}$$

Keterangan:

- α : konstanta
- β : koefisien regresi
- X_{it} : variabel independen
- i : jumlah observasi (*cross section*)
- t : banyaknya periode waktu (*time series*)
- ε_{it} : *error term*

Bentuk persamaan untuk model panel FMOLS yang disertakan dalam penelitian ini memodifikasi model yang digunakan oleh Hardi et al., (2023), yaitu sebagai berikut:

Persamaan 1:

$$LOGCF_{ASEAN} = \alpha_i + \beta_1 REC_{it} + \beta_2 FDI_{it} + \beta_3 AL_{it} + \beta_4 IDS_{it} + \varepsilon_{it}$$

Persamaan 2:

$$LOGCF_{SAARC} = \alpha_i + \beta_1 REC_{it} + \beta_2 FDI_{it} + \beta_3 AL_{it} + \beta_4 IDS_{it} + \varepsilon_{it}$$

Keterangan:

α	Konstanta
β	: Koefisien regresi
Log carbon footprint (LOGCF)	: Logaritma natural jejak karbon (juta ton)
Renewable energy consumption (REC)	: Konsumsi energi terbarukan (persen dari total konsumsi energi)
Foreign direct investment (FDI)	: Investasi asing langsung (pesen dari PDB)
Agriculture land (AL)	: Lahan pertanian (persen dari PDB)
Industry 4.0 (IDS)	: Industri 4.0 (persen dari total nilai tambah sektor manufaktur)
i	: Jumlah observasi (9 negara <i>low-middle income</i>)
t	: Banyaknya periode waktu (30 tahun mulai dari Tahun 1992-2021)
ε_{it}	: <i>error term</i>

Dalam data panel, FMOLS dapat diterapkan dalam dua pendekatan utama yaitu FMOLS *pooled* dan FMOLS *mean group*. FMOLS *pooled* estimator menggunakan dimensi *within* (perbedaan dalam kelompok) sedangkan FMOLS *group mean* estimator menggunakan dimensi *between* (membandingkan antar kelompok) (Pedroni, 1999). FMOLS *pooled* estimator menggabungkan seluruh data panel dan mengestimasi satu koefisien jangka panjang yang berlaku untuk semua unit cross section. FMOLS *mean group* estimator mengestimasi koefisien jangka panjang secara terpisah untuk masing-masing unit *cross-section*. Artinya, FMOLS *pooled* cocok untuk data panel yang bersifat homogen, sedangkan FMOLS *mean group* cocok untuk data panel yang bersifat heterogen. Pada penelitian ini, data panel di masing-masing kawasan diasumsikan bersifat homogen karena negara-negara yang diteliti berada dalam kategori *low-middle income* dan memiliki karakteristik struktural yang tidak terlalu berbeda, baik dari sisi pembangunan ekonomi, pola industrialisasi, maupun

kelestarian lingkungan. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan FMOLS *pooled* sebagai dasar estimasi regresinya.

3.3.3.1 Koefisien Regresi Parsial Panel FMOLS

Melalui metode FMOLS ini, 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. Pengaruh parsial setiap variabel independen terhadap variabel dependen dapat dilihat melalui nilai t-statistik untuk masing-masing variabel independen. Nilai t-statistik ini tidak dipengaruhi oleh parameter yang mengganggu atau tidak relevan dan memiliki distribusi normal asimtotik, sehingga memungkinkan kesimpulan statistik yang valid (Kao & Chiang, 1999). Penelitian ini menggunakan panel t-statistik yang dikembangkan oleh Pedroni (2001) yaitu *within-dimension statistics (panel tests)*. Panel t-statistik ini menggabungkan berbagai *cross-section* dan berbagai *time series* untuk dianalisis secara bersamaan.

Uji pengaruh parsial (uji t) digunakan untuk menguji apakah nilai koefisien variabel independen secara individu mempunyai pengaruh signifikan atau tidak terhadap variabel dependen (Mubarak, 2021). Adapun hipotesis yang diuji dalam t-statistik ini adalah:

$H_0 : \beta_1 = 0$, tidak terdapat pengaruh jangka panjang variabel independen terhadap variabel dependen.

$H_a : \beta_1 \neq 0$, terdapat pengaruh jangka panjang variabel independen terhadap variabel dependen.

Pengambilan keputusan uji parsial (uji t) dalam estimasi *pooled* FMOLS ini dilakukan dengan kriteria:

Jika probabilitas t-statistik > tingkat signifikansi $\alpha = 5\%$ (0,05), maka H_0 diterima, artinya variabel

independen tidak berpengaruh signifikan dalam jangka panjang.

Jika probabilitas t-statistik < tingkat signifikansi $\alpha = 5\%$ (0,05), maka H_0 ditolak, artinya variabel independen berpengaruh signifikan dalam jangka panjang.

3.3.3.2 Goodness of Fit

Goodness of Fit dalam penelitian ini digunakan untuk menilai sejauh mana model estimasi mampu merepresentasikan data empiris. Indikator umum *Goodness of Fit* ini adalah R-square (R^2) dan Adjusted R-square. R^2 digunakan untuk mengukur sejauh mana variabel independen mampu menjelaskan variasi variabel dependen. Jika nilai R^2 semakin mendekati 1, maka semakin baik kemampuan variabel independen menjelaskan variasi data variabel dependen. Penggunaan R^2 dalam analisis regresi dapat menimbulkan bias karena nilai R^2 dapat tetap naik ketika menambahkan variabel independen yang tidak relevan (Keer et al., 2023). Untuk mengatasi masalah tersebut, digunakan Adjustes R-square. Nilai Adjusted R-square ini sudah melakukan penyesuaian jumlah variabel independen dan jumlah observasi agar tidak terjadi overestimation.

Dalam konteks panel kointegrasi seperti FMOLS, Goodness of Fit tidak hanya dinilai melalui R^2 dan Adjusted R-square, tetapi juga long-run variance (kestabilan jangka panjang). Long-run variance berfungsi guna memastikan bahwa hasil estimasi koefisien jangka panjang bebas dari masalah autokorelasi dan heteroskedastisitas (Pedroni, 1999). Nilai long-run mengindikasikan kestabilan varians residual dalam jangka panjang

Dengan demikian, *Godness of Fit* digunakan untuk menilai apakah model dalam penelitian ini mampu menggambarkan secara tepat

hubungan jangka panjang antara variabel independen (konsumsi energi terbarukan, investasi asing langsung, lahan pertanian, dan proporsi nilai tambah manufaktur berteknologi menengah dan tinggi) terhadap variabel dependen yaitu emisi CO₂ pada negara-negara *low-middle income* di Kawasan ASEAN dan SAARC.

tidak ramah lingkungan. Sejalan dengan ASEAN, pemerintah negara-negara *low-middle income* di Kawasan SAARC perlu melakukan integrasi kebijakan transisi energi terbarukan ke dalam rencana pembangunan ekonomi jangka panjang guna memastikan bahwa penurunan emisi CO₂ merupakan tujuan berkelanjutan negara-negara di kawasan ini.

Selain itu, hasil penelitian juga menyebutkan bahwa proporsi nilai tambah manufaktur berteknologi menengah dan tinggi (IDS) berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂ di Kawasan SAARC. Hal ini menandakan bahwa inovasi teknologi pada sektor industri dan manufaktur berkontribusi terhadap kenaikan emisi CO₂. Temuan ini menunjukkan bahwa industrialisasi di negara berkembang berpotensi memperburuk kondisi lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, pemerintah negara-negara *low-middle income* di Kawasan SAARC perlu memprioritaskan transformasi industri, seperti menerapkan regulasi lingkungan yang lebih ketat, penggunaan energi terbarukan, serta penerapan teknologi yang efisien agar upaya dalam meningkatkan pertumbuhan ekonomi tidak selalu menghasilkan emisi CO₂ yang berlebihan.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari rumusan, hipotesis, hasil analisis dan pembahasan yang telah dijelaskan dalam penelitian ini maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil estimasi di Kawasan ASEAN diperoleh hasil sebagai berikut:
 - a. Variabel konsumsi energi terbarukan (REC) persen dari total konsumsi energi berpengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi CO₂ dalam jangka panjang di Kawasan ASEAN. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap peningkatan konsumsi energi di kawasan ini maka akan menurunkan emisi CO₂. Hal ini mengindikasikan bahwa transisi dari penggunaan energi fosil ke sumber energi terbarukan dalam jangka panjang merupakan salah satu upaya dalam menekan laju emisi CO₂ di negara-negara berkembang.
 - b. Variabel arus masuk investasi asing langsung (FDI) persen dari PDB berpengaruh positif dan tidak signifikan terhadap emisi CO₂ dalam jangka panjang hanya di Kawasan ASEAN. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan arus masuk investasi asing langsung di ASEAN akan meningkatkan emisi CO₂. Hal ini mengindikasikan bahwa *Pollution Haven Hypothesis* (PHH) dalam penelitian ini valid, tetapi investasi asing langsung bukan merupakan variabel penentu emisi CO₂ dalam jangka panjang di ASEAN.
 - c. Variabel lahan pertanian (AL) persen dari total area lahan berpengaruh negatif dan tidak signifikan terhadap emisi CO₂ dalam

jangka panjang di Kawasan ASEAN. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan lahan pertanian di kawasan ini berpotensi dapat menurunkan emisi CO₂ dalam jangka panjang. Hal ini mengindikasikan bahwa sektor pertanian bukan determinan utama emisi CO₂, namun tetap memiliki potensi sebagai variabel yang dapat mengurangi emisi CO₂.

2. Berdasarkan hasil estimasi di Kawasan SAARC diperoleh hasil sebagai berikut:
 - a. Variabel konsumsi energi terbarukan (REC) persen dari total konsumsi energi berpengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi CO₂ dalam jangka panjang di Kawasan SAARC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap peningkatan konsumsi energi di kawasan ini maka akan menurunkan emisi CO₂. Hal ini mengindikasikan bahwa peralihan dari penggunaan energi fosil ke sumber energi terbarukan dalam jangka panjang merupakan salah satu upaya dalam menekan laju emisi CO₂ di negara-negara berkembang.
 - b. Variabel lahan pertanian (AL) persen dari total area lahan berpengaruh negatif dan tidak signifikan terhadap emisi CO₂ dalam jangka panjang di Kawasan SAARC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan lahan pertanian di kawasan ini berpotensi dapat menurunkan emisi CO₂ dalam jangka panjang. Hal ini mengindikasikan bahwa sektor pertanian bukan determinan utama emisi CO₂, namun tetap memiliki potensi sebagai variabel yang dapat mengurangi emisi CO₂.
 - c. Variabel nilai tambah manufaktur berteknologi menengah dan tinggi (IDS) persen dari total nilai tambah manufaktur berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂ dalam jangka panjang hanya di Kawasan SAARC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan nilai tambah manufaktur berteknologi menengah dan tinggi akan meningkatkan emisi CO₂ dalam jangka panjang. Hal ini mengindikasikan bahwa inovasi teknologi pada sektor manufaktur

dan industri berkontribusi terhadap kenaikan emisi yang mendorong terjadinya degradasi lingkungan.

5.2 Saran

Saran yang disampaikan dalam penelitian diuraikan sebagai berikut:

1. Pemerintah di negara-negara *low-middle income* Kawasan ASEAN perlu mendorong pengembangan sektor energi terbarukan. Upaya yang dapat dilakukan antara lain memperkuat regulasi yang mendukung transisi energi dan memperluas investasi dalam infrastruktur energi terbarukan seperti biomassa, hidro, dan tenaga surya yang relevan dengan kondisi geografis Asia Tenggara. Dengan ini, energi terbarukan akan dapat lebih berkontribusi secara maksimal dan berkelanjutan.
2. Pemerintah di negara-negara *low-middle income* Kawasan SAARC perlu mendorong pengembangan sektor energi terbarukan. Upaya yang dapat dilakukan antara lain mengalihkan investasi menuju energi terbarukan dan memperluas infrastruktur energi hijau guna mengurangi ketergantungan terhadap energi tidak ramah lingkungan. Dengan ini, energi terbarukan akan dapat lebih berkontribusi secara maksimal dan berkelanjutan. Selain itu, pemerintah di negara-negara *low-middle income* Kawasan SAARC diharapkan dapat mengimplementasikan kebijakan yang seimbang antara pertumbuhan industri dan pembangunan industri yang berkelanjutan. Transformasi industri 4.0 ini harus diiringi dengan penerapan teknologi yang efisien, penggunaan energi terbarukan, serta regulasi lingkungan yang lebih ketat. Dengan ini, proses industrialisasi modern dapat berjalan tanpa menghasilkan emisi CO₂ yang berlebihan.
3. Dalam rangka mengurangi emisi CO₂, pemerintah di negara-negara *low-middle income* Kawasan ASEAN dan SAARC diharapkan mampu mengimplementasikan pembangunan yang berkelanjutan. Sehingga sejalan dengan tujuan SGGs nomor 7 yaitu energi bersih dan terjangkau, SDGs nomor 9 yaitu industri, inovasi, dan infrastruktur, SDGs nomor 12 yaitu konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab, serta tujuan

SDGs nomor 13 yaitu penanganan perubahan iklim. Di samping itu, mengingat ASEAN dan SAARC merupakan kawasan dengan pertumbuhan ekonomi yang pesat seiring dengan tantangan lingkungan yang tinggi, diperlukan adanya kerja sama regional dalam memitigasi emisi CO₂ agar dapat mempercepat pencapaian target pembangunan yang berkelanjutan. Dalam rangka mengurangi emisi CO₂, pemerintah di negara-negara *low-middle income* Kawasan ASEAN dan SAARC diharapkan mampu mengimplementasikan pembangunan yang berkelanjutan. Sehingga, segala aktivitas masyarakat dapat berjalan seiring dengan pelestarian lingkungan

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, L. (2015). Linear Relationship Between CO2 Emissions and Economic Variables: Evidence From a Developed Country and a Developing Country. *Journal of Sustainable Development*, 8(2), 66–72. <https://doi.org/10.5539/jsd.v8n2p66>
- ADB. (2021). *Developing Agriculture and Tourism for Inclusive Growth in the Lao People's Democratic Republic*. <https://doi.org/10.22617/SGP210337-2>
- Adebayo, T. S., & Kirikkaleli, D. (2021). Impact of Renewable Energy Consumption, Globalization, and Technological Innovation on Environmental Degradation in Japan: Application of Wavelet Tools. *Environment, Development and Sustainability*, 23(11), 16057–16082. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01322-2>
- Adedoyin, F. F., Bekun, F. V., Eluwole, K. K., & Adams, S. (2022). Modelling the Nexus between Financial Development, FDI, and CO2 Emission: Does Institutional Quality Matter? *Energies*, 15(20). <https://doi.org/10.3390/en15207464>
- Adrian, M. A. (2023). Analisis Pengaruh Aktivitas Ekonomi terhadap Peningkatan Emisi Karbon: Studi Empiris Empat Negara ASEAN. *Jurnal Ekonomi Indonesia* •, 12, 187–202.
- Afifah, F., & Rahmizal, M. (2025). Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Emisi Karbon di ASEAN dengan Penanaman Modal Asing sebagai Variabel Moderasi. *Media Riset Ekonomi Pembangunan (MedREP)*. <https://medrep.ppj.unp.ac.id/index.php/MedREP/login>
- 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>

- Alex, B., & Johnson, M. (2025). *A Framework for IoT-Enabled Smart Manufacturing for Energy and Resource Optimization*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.03040>
- Aliasuddin, A., Rahmi, N., Tabrani, M., Nashrillah, N., & Fachrurrozi, K. (2022). Pelatihan Online Metode Kuantitatif: Model Runtun Waktu Terapan. *Jurnal Pemberdayaan Umat*, 1(1), 51–59. <https://doi.org/10.35912/jpu.v1i1.895>
- Amoah, J. O., Alagidede, I. P., & Sare, Y. A. (2023). Impact of Foreign Direct Investment on Carbon Emission in Sub-Saharan Africa: The Mediating and Moderating Roles of Industrialization and Trade Openness. *Cogent Business and Management*, 10(3). <https://doi.org/10.1080/23311975.2023.2266168>
- Ariefianto, M. D., & Trinugroho, I. (2021). *Statistik dan Ekonometrika Terapan Aplikasi dengan STATA*. Erlangga.
- Arifiyah, N. F., & Wasil, M. (2025). Analisis EKC: Pengaruh Pertumbuhan Ekonomi, FDI, Keterbukaan Perdagangan Terhadap Emisi CO2 ASEAN-7. *Independent: Journal of Economics*, 5. <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/independent>
- 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>
- Avenyo, E., & Tregenna, F. (2021). *The Effects of Technology Intensity in Manufacturing on CO2 Emissions: Evidence from Developing Countries*.
- 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>
- Balsalobre-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.
- Baltagi, B. H., & Kao, C. (2000). Nonstationary Panels, Cointegration in Panels and Dynamic Panels: A Survey. In *Center for Policy Research Working Paper No.16*. <http://ssrn.com/abstract=1808022> Electronic copy available at: <https://ssrn.com/abstract=1808022>

- 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)*.
- Bhattacharya, M., Paramati, S. R., Ozturk, I., & Bhattacharya, S. (2016). The Effect of Renewable Energy Consumption on Economic Growth: Evidence from Top 38 Countries. *Applied Energy*, 162, 733–741. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.104>
- Boussaidi, R., Jebli, M. Ben, & Bakoben, H. B. M. (2025). The Non-Linear Impact of Medium and High-Technology Manufacturing on Environmental Quality: Evidence from Leading Technological Economies Using a PSTR Approach. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 15(2), 510–520. <https://doi.org/10.32479/ijeep.18419>
- 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. Haïtes, Y. Jung, R. Stavins, ... Y. Park, Eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- Chapman, M., Walker, W. S., Cook-Patton, S. C., Ellis, P. W., Farina, M., Griscom, B. W., & Baccini, A. (2020). Large Climate Mitigation Potential from Adding Trees to Agricultural Lands. *Global Change Biology*, 26(8), 4357–4365. <https://doi.org/10.1111/gcb.15121>
- 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>

- Chiriluș, A., & Costea, A. (2023). The Effect of FDI on Environmental Degradation in Romania: Testing the Pollution Haven Hypothesis. *Sustainability (Switzerland)*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/su151310733>
- Danhas, Y., & Muchtar, B. (2021). *Ekonomi Lingkungan*. Deepublish Publisher.
- Djaali, H. (2021). *Metode Penelitian Kuantitatif*. Bumi Aksara.
- Dogan, E., & Ozturk, I. (2017). The Influence of Renewable and Non-Renewable Energy Consumption and Real Income on CO2 Emissions in the USA: Evidence from Structural Break Tests. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(11), 10846–10854. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8786-y>
- Du, L., Jiang, H., Adebayo, T. S., Awosusi, A. A., & Razzaq, A. (2022). Asymmetric Effects of High-Tech Industry and Renewable Energy on Consumption-Based Carbon Emissions in MINT Countries. *Renewable Energy*, 196, 1269–1280. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.028>
- Durojaye, O., Laseinde, T., & Oluwafemi, I. (2020). A Descriptive Review of Carbon Footprint. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1026, 960–968. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27928-8_144
- East, A. J., & Growcom. (2008). *Vegetable Industry Carbon Footprint Scoping Study What is a Carbon Footprint? An Overview of Definitions and Methodologies*.
- Elnadi, M., & Abdallah, Y. O. (2024). Industry 4.0: Critical Investigations and Synthesis of Key Findings. *Management Review Quarterly*, 74(2), 711–744. <https://doi.org/10.1007/s11301-022-00314-4>
- ESCAP. (2021). *Asia and The Pacific : SDG Progress Report 2021*. United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific.
- ESCAP. (2022). *Asia and The Pacific SDG Progress Report 2022 : Widening Disparities Amid Covid-19*. United Nations.
- 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>
- European Commision. (2024). *Causes of Climate Change*. https://Climate.Ec.Europa.Eu/Climate-Change/Causes-Climate-Change_en.

- 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>
- Gan, Y., Liang, C., Hamel, C., Cutforth, H., & Wang, H. (2011). Strategies for Reducing The Carbon Footprint of Field Crops for Semiarid Areas. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31(4), 643–656. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0011-7>
- Global Carbon Budget. (2024a). *Annual CO₂ Emissions* . With Major Processing by Our World in Data.GCB” [Dataset]. Global Carbon Project, “Global Carbon Budget” [Original Data].
- Global Carbon Budget. (2024b). *Annual CO₂ Emissions by World Region – GCB*. With Major Processing by Our World in Data.Global Carbon Project, “Global Carbon Budget” [Original Data]. Retrieved December 1, 2024 from <https://Ourworldindata.Org/Grapher/Annual-Co-Emissions-by-Region>.
- Global Footprint Network. (2024). *Climate Change & the Carbon Footprint*. <https://www.Footprintnetwork.Org/Our-Work/Climate-Change/>.
- Global Forest Watch. (2024). *Country Tree Cover Loss in Mha*. <https://www.Globalforestwatch.Org/Dashboards/Global/?Lang=en>.
- Gunarto, T., Ciptawaty, U., Yulawan, 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>
- Houghton, R. A., House, J. I., Pongratz, J., Werf, G. R. Van Der, Defries, R. S., Hansen, M. C., Quéré, C. L., & Ramankutty, N. (2012). Carbon Emissions from Land Use and Land-cover Change. *Biogeosciences*, 9(12), 5125–5142. <https://doi.org/10.5194/bg-9-5125-2012>
- Im, K. S., Pesaran, M. H., & Shin, Y. (2003). Testing for Unit Roots in heterogeneous Panels. *Journal of Econometrics*, 115(1), 57–74.

- IPCC. (2022). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability* (pp. 3–34). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>
- Irma, M. F., & Gusmira, E. (2024). Tingginya Kenaikan Suhu Akibat Peningkatan Emisi Gas Rumah Kaca di Indonesia. *JSSIT: Jurnal Sains Dan Sains Terapan*, *II*(1).
- Islam, R., Bashawir, A., Ghani, A., & Mahyudin, E. (2017). Carbon Dioxide Emission, Energy Consumption, Economic Growth, Population, Poverty and Forest Area: Evidence from Panel Data Analysis. *International Journal of Energy Economics and Policy* |, *7*(4), 99–106. <http://www.econjournals.com>
- 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>
- Jebli, M. Ben, & Youssef, S. Ben. (2015). The Role of Renewable Energy and Agriculture in Reducing CO2 Emissions: Evidence for North Africa Countries. In *MPRA Paper* (68477).
- 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>
- Kara, F., Bas, T., Tirmandioğlu Talu, N. H., & Alola, A. A. (2022). Investigating the Carbon Emission Aspects of Agricultural Land Utilization in Turkey. *Integrated Environmental Assessment and Management*, *18*(4), 988–996. <https://doi.org/10.1002/ieam.4536>
- Kazemzadeh, E., Fuinhas, J. A., Salehnia, N., Koengkan, M., Shirazi, M., & Osmani, F. (2021). *Factors Driving CO2 Emissions: The Role of Energy Transition and Brain Drain*.
- Keer, M., Lohiya, H., & Chouhan, S. (2023). Goodness of Fit for Linear Regression using R squared and Adjusted R-Squared. *International Journal of Research Publication and Reviews Journal Homepage: Www.Ijrpr.Com*, *4*, 2431–2439. www.ijrpr.com
- 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>
- Kohnová, L., & Salajová, N. (2023). Impact of Industry 4.0 on Companies: Value Chain Model Analysis. *Administrative Sciences*, 13(35). <https://doi.org/10.3390/admsci13020035>
- Kumar, B. M., & Aravindakshan, S. (2022). Carbon Footprints of the Indian AFOLU (Agriculture, Forestry, and Other Land Use) Sector: a Review. *Carbon Footprints*, 1(1). <https://doi.org/10.20517/cf.2022.04>
- 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>
- Levin, A., Lin, C. F., & Chu, C. (1992). Unit Root Tests in Panel Data: Asymptotic and Finite Sample Properties. *USCD Discussion Papers*.
- Levinson, A., & Taylor, M. S. (2008). Unmasking the Pollution Haven Effect. *International Economic Review*, 49(1), 223–254. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2354.2008.00478.x>
- Li, B., Nian, V., Shi, X., Li, H., & Boey, A. (2020). Perspectives of Energy Transitions in East and Southeast Asia. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 9(1). <https://doi.org/10.1002/wene.364>
- Liang, L., Guo, Y., Li, Y., & Han, D. (2025). How Can China's Manufacturing Industry Achieve Better Development? A Carbon Resilience Perspective Based on the System GMM Model. *Humanities and Social Sciences Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1057/s41599-025-05564-7>
- Liddle, B. (2012). The Importance of Energy Quality in Energy Intensive Manufacturing: Evidence from Panel Cointegration and Panel FMOLS. *Published in Energy Economics*, 34, 1819–1825. <http://ssrn.com/abstract=2231271> Electronic copy available at: <https://ssrn.com/abstract=2231271> Electronic copy available at: <http://ssrn.com/abstract=2231271>

- 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>
- Matthews, H. S., Hendrickson, C. T., & Weber, C. L. (2008). The Importance of Carbon Footprint Estimation Boundaries. In *Environmental Science and Technology* (Vol. 42, Number 16, pp. 5839–5842). <https://doi.org/10.1021/es703112w>
- McWilliams, A., Parhankangas, A., Coupet, J., Welch, E., & Barnum, D. T. (2014). Strategic Decision Making for the Triple Bottom Line. *Business Strategy and the Environment*, 25(3), 193–204. <https://doi.org/10.1002/bse.1867>
- Mow, M., Yeasmin, R., Hasan, F., Rahman, M., Asif, M., Prince, A., Mohiuddin, A. S. M., & Mia, S. (2025). Carbon Sequestration in Bangladesh: Mitigating Climate Change Through Sustainable Agricultural Practices. *Malaysian Journal of Sustainable Agriculture (MJSA)*, 9(1), 42–46. <https://doi.org/10.26480/mjsa.01.2025.42.46>
- Mubarak AS, M. A., & Endraswati, H. (2023). Investigating the Impact of FDI, Foreign Aid, and Islamic Capital Markets on Carbon Emission in ASEAN: The Moderating Role of Regulatory Quality. *Journal of Economics Development Issues*, 6(2), 60–74. <https://doi.org/10.33005/jedi.v6i2.162>

- 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
- Murshed, M., Elheddad, M., Ahmed, R., Bassim, M., & Than, E. T. (2022). Foreign Direct Investments, Renewable Electricity Output, and Ecological Footprints: Do Financial Globalization Facilitate Renewable Energy Transition and Environmental Welfare in Bangladesh? *Asia-Pacific Financial Markets*, 29(1), 33–78. <https://doi.org/10.1007/s10690-021-09335-7>
- Musyarof, Z., & Qomari, I. N. (2023). Pengaruh Pertumbuhan Ekonomi terhadap Emisi Gas Karbon Dioksida (CO₂): Data Panel Negara ASEAN Tahun 2000-2019. *Ecoplan*, 6(2), 87–99. <https://doi.org/10.20527/ecoplan.v6i2.624>
- 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>
- Nguyen, A. T., Lu, S. H., & Nguyen, P. T. T. (2021). Validating and Forecasting Carbon Emissions in the Framework of the Environmental Kuznets Curve: The Case of Vietnam. *Energies*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/en14113144>
- Noor, M. A., & Saputra, P. M. A. (2020). Emisi Karbon dan Produk Domestik Bruto: Investigasi Hipotesis Environmental Kuznets Curve (EKC) pada Negara Berpendapatan Menengah di Kawasan ASEAN. *Jurnal Wilayah Dan Lingkungan*, 8(3), 230–246. <https://doi.org/10.14710/jwl.8.3.230-246>
- OECD. (2025). *Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2025: Making the Most of the Trade and Environment Nexus in Agriculture*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/a80ac398-en>
- 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*.

- Panayotou, T. (2003). Economics Growth and The Environmental. *Havard University and Syprus International Institute of Management*.
- Pata, U. K., Dam, M. M., & Kaya, F. (2022). How Effective Are Renewable Energy, Tourism, Trade Openness, and Foreign Direct Investment on CO2 Emissions? An EKC Analysis for ASEAN Countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(6), 14821–14837. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23160-z>
- 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*.
- Prinadi, A. N., Sarungu, J. J., Suryantoro, A., & Gravitiani, E. (2022). Dampak Pertumbuhan Ekonomi, Nilai Tambah Industri, dan Populasi Terhadap Emisi Karbon Dioksida di Kawasan ASEAN. *Prosiding Nasional 2022*.
- Qamruzzaman, M. (2024). Do Natural Resources Bestow or Curse the Environmental Sustainability in Cambodia? Nexus Between Clean Energy, Urbanization, and Financial Deepening, Natural Resources, and Environmental Sustainability. *Energy Strategy Reviews*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101412>
- Rafiq, S., Salim, R., & Apergis, N. (2016). Agriculture, Trade Openness and Emissions: an Empirical Analysis and Policy Options. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 60(3), 348–365. <https://doi.org/10.1111/1467-8489.12131>
- 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. (2023). The Dynamic Nexus Between Economic Growth, Renewable Energy Use, Urbanization, Industrialization, Tourism, Agricultural Productivity, Forest Area, and Carbon Dioxide Emissions in the Philippines. *Energy Nexus*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100180>

- Raihan, A., Hasan, M. A., Voumik, L. C., Pattak, D. C., Akter, S., & Ridwan, M. (2024). Sustainability in Vietnam: Examining Economic Growth, Energy, Innovation, Agriculture, and Forests' Impact on CO₂ emissions. *World Development Sustainability*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.wds.2024.100164>
- Raihan, A., Muhtasim, D. A., Farhana, S., Hasan, M. A. U., Pavel, M. I., Faruk, O., Rahman, M., & Mahmood, A. (2022). Nexus Between Economic Growth, Energy Use, Urbanization, Agricultural Productivity, and Carbon Dioxide Emissions: New Insights from Bangladesh. *Energy Nexus*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100144>
- Raihan, A., Pavel, M. I., Muhtasim, D. A., Farhana, S., Faruk, O., & Paul, A. (2023). The Role of Renewable Energy Use, Technological Innovation, and Forest Cover Toward Green Development: Evidence from Indonesia. *Innovation and Green Development*, 2(1). <https://doi.org/10.1016/j.igd.2023.100035>
- 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. (2022a). 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>
- Raihan, A., & Tuspekova, A. (2022b). Dynamic Impacts of Economic Growth, Renewable Energy Use, Urbanization, Industrialization, Tourism, Agriculture, and Forests on Carbon Emissions in Turkey. *Carbon Research*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44246-022-00019-z>
- Raihan, A., & Tuspekova, A. (2022c). Nexus Between Economic Growth, Energy Use, Agricultural Productivity, and Carbon Dioxide Emissions: New Evidence from Nepal. *Energy Nexus*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100113>
- 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>
- Sahara, S. J. N., & Rahadian, H. (2023). The Effects of Economic Growth, Financial Development, Trade Openness, and Energy Consumption on CO₂ Emission in Indonesia. *Jurnal Ekonomi Pembangunan*, 21(2), 157–165. <https://doi.org/10.29259/jep.v21i2.22163>

- Sahoo, M., & Sahoo, J. (2022). Effects of Renewable and Non-Renewable Energy Consumption on CO₂ Emissions in India: Empirical Evidence From Disaggregated Data Analysis. *Journal of Public Affairs*, 22(1). <https://doi.org/10.1002/pa.2307>
- Salonitis, K. (2023). Manufacturing Energy Efficiency and Industry 4.0. *Energies*, 16(2268). <https://doi.org/10.3390/en16052268>
- Samreen, H., Wizarat, S., Mehdi, Z., & Ahmed, R. (2021). Exploring the Relationship between Foreign Investments and Carbon Emission: A Bound Test Analysis for Pakistan. In *Technology & Applied Science Research* (Vol. 11, Number 5). www.etasr.com
- 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>
- Saqib, N. (2022). Green Energy, Non-Renewable Energy, Financial Development and Economic Growth with Carbon Footprint: Heterogeneous Panel Evidence from Cross-Country. *Economic Research-Ekonomska Istrazivanja*, 35(1), 6945–6964. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2022.2054454>
- 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>
- Shaari, M. S., Majekodunmi, T. B., Sulong, A., Esquivias, M. A., & Yusoff, W. S. (2024). Examining the Interplay Between Green Technology, CO₂ Emissions, and Life Expectancy in the ASEAN-5 Countries: Insights from the Panel FMOLS and DOLS approaches. *Discover Sustainability*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00706-4>
- Shao, Y. (2018). Does FDI affect carbon intensity? New evidence from dynamic panel analysis. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 10(1), 27–42. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-03-2017-0062>
- 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>
- Sukirno, S. (2000). *Makro Ekonomi Modern*. PT. Raja Grafindo Perkasa.
- 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-Ekonomska 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). BPFE.
- Tashim, M. T., & Rudatin, A. (2023). Analisis Ekonomi Negara BRICS Terhadap Emisi Karbon Dioksida (CO₂). *Jurnal Kebijakan Ekonomi Dan Keuangan*, 2(2), 205–214. <https://doi.org/10.20885/jkek.vol2.iss2.art12>
- Tian, L. Y. (2023). The Impact of Trade, Foreign Direct Investment (FDI), and Economic Growth on Carbon Dioxide (CO₂) Emissions in Selected Asian Countries. *UNIMAS REVIEW OF ACCOUNTING AND FINANCE*, 7(1), 2023.
- Tian, X., Kohar, U. H. A., Khatib, S. F. A., & Wang, Y. (2024). Nudging Sustainable Development: Reviewing Energy Transition and Economic Development. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 16, Number 8). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su16083101>
- Timilsina, A. P., Malla, G., Paudel, B. P., Sharma, A., Rimal, R., Gaire, A., & Bhandari, H. L. (2019). Estimation of Carbon Emission from Agricultural and Pasture Field. *Journal of Bioscience and Agriculture Research*, 22(2), 1835–1839. <https://doi.org/10.18801/jbar.220219.226>
- Todaro, M. P., & Smith, S. C. (2009). *Pembangunan Ekonomi Jilid 1* (A. Dharma, A. Maulana, & N. I. Sallama, Eds.; Edisi Kesebelas). Erlangga.
- Tsai, W. H. (2023). Balancing Profit and Environmental Sustainability with Carbon Emissions Management and Industry 4.0 Technologies. *Energies*, 16(17). <https://doi.org/10.3390/en16176175>
- 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>
- Tukhtamurodov, A., Sobirov, Y., Toshaliyeva, S., Ibrayimova, D., & Feruz, M. (2024). Determinants of CO₂ Emissions in the BRICS: A Dynamic Panel ARDL Approach. *BIO Web of Conferences*, 82. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248206002>
- UNCTAD. (2024). *Digital Economy Report 2024: Chapter V: E-Commerce and Environmental Sustainability*.

- Van Hung, N., Thach, T. N., Hoang, N. N., Binh, N. C. Q., Tâm, D. M., Hau, T. T., Anh, D. T. T., Khuong, T. Q., Chi, V. T. B., Lien, T. T. K., Gummert, M., Rakotoson, T., Saito, K., & Kumar, V. (2024). Mechanized Wet Direct Seeding for Increased Rice Production Efficiency and Reduced Carbon footprint. *Precision Agriculture*, 25(5), 2226–2244. <https://doi.org/10.1007/s11119-024-10163-8>
- Voumik, L. C., Hossain, M. I., Rahman, M. H., Sultana, R., Dey, R., & Esquivias, M. A. (2023). Impact of Renewable and Non-Renewable Energy on EKC in SAARC Countries: Augmented Mean Group Approach. *Energies*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/en16062789>
- 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. (2024). The Relationship Between the Renewable Energy and CO2 Emissions to the Indonesian Economy. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 14(3), 349–357. <https://doi.org/10.32479/ijeep.15903>
- Wahyudi, H., Gunarto, T., Ciptawaty, U., Aida, N., Yunita, R., & Putri, R. M. (2024). The Influence of Determinats 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>
- Wahyudi, H., & Palupi, W. A. (2023). Relationship between Energy Consumption, Foreign Direct Investment, and Labor Force Participation Using the VECM Model: Empirical Study in OECD Countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 13(2), 157–165. <https://doi.org/10.32479/ijeep.13999>
- Wahyudi, H., Suropto, & Palupi, W. A. (2023). Long-Term Implications of Economic Complexity and Energy Intensity on the Environment in Lower-Middle-Income Countries in Asia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 13(1), 164–171. <https://doi.org/10.32479/ijeep.13737>
- Wang, Q., & Liu, S. (2022). How Do FDI and Technological Innovation Affect Carbon Emission Efficiency in China? *Energies*, 15(23). <https://doi.org/10.3390/en15239209>
- Wei, G., Bi, M., Liu, X., Zhang, Z., & He, B. J. (2023). Investigating the Impact of Multi-dimensional Urbanization and FDI on Carbon Emissions in the Belt and Road Initiative Region: Direct and Spillover Effects. *Journal of Cleaner Production*, 384. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135608>

- 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>
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2007). *A Definition of "Carbon Footprint."* www.censa.org.uk
- World Bank. (2022). *Spearheading Vietnam's Green Agriculture: Moving to Low-Carbon Rice*. DC: World Bank. www.worldbank.org
- World Development Indicators. (2024a). *Agriculture Land*. <https://Databank.Worldbank.Org/Source/World-Development-Indicators#>.
- World Development Indicators. (2024b). *Foreign Direct Investment*. <https://Databank.Worldbank.Org/Source/World-Development-Indicators#>.
- World Development Indicators. (2024c). *Medium and High-Tech Manufacturing Value Added*. <https://Databank.Worldbank.Org/Source/World-Development-Indicators#>.
- World Development Indicators. (2024d). *Renewable Energy Consumption*. <https://Databank.Worldbank.Org/Source/World-Development-Indicators#>.
- You, Z., Li, L., & Waqas, M. (2024). How Do Information and Communication Technology, Human Capital and Renewable Energy Affect CO₂ Emission; New Insights from BRI Countries. *Heliyon*, 10(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26481>
- 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>
- Zimon, G., Pattak, D. C., Voumik, L. C., Akter, S., Kaya, F., Walasek, R., & Kočański, K. (2023). The Impact of Fossil Fuels, Renewable Energy, and Nuclear Energy on South Korea's Environment Based on the STIRPAT Model: ARDL, FMOLS, and CCR Approaches. *Energies*, 16(17). <https://doi.org/10.3390/en16176198>
- 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>