

**Determinan Emisi CO₂ di negara-negara OECD: Pendekatan STIRPAT
dengan Estimasi Dynamic Panel Data Generalized Method of Moments
(GMM)**

(Tesis)

Oleh

**ESHA GALANG GATI MAHENDRA
2421021004**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER EKONOMI
FAKULTAS EKONOMI DAN BISNIS
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

Determinan Emisi CO₂ di negara-negara OECD: Pendekatan STIRPAT dengan Estimasi Dynamic Panel Data Generalized Method of Moments (GMM)

Oleh

Esha Galang Gati Mahendra

Penelitian ini bertujuan untuk melihat bagaimana pengaruh dari variabel bebas seperti jumlah penduduk, GDP per kapita dan khususnya intensitas energi dapat memengaruhi peningkatan emisi CO₂ di negara-negara OECD. Penelitian ini berfokus pada analisis peran teknologi yang diproksikan melalui intensitas energi dalam kerangka model STIRPAT, serta pengaruhnya terhadap peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂). Data yang digunakan adalah data panel tahun 2010-2022 mencakup 38 negara anggota OECD. Metode yang digunakan dalam penelitian adalah regresi panel dinamis atau GMM (Generalized Method of Moments), sedangkan model yang terpilih untuk menjelaskan hubungan pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat adalah model System GMM (Sys-GMM). Hasilnya, Variabel *lag* 1 emisi CO₂ berpengaruh positif terhadap emisi CO₂ pada periode berikutnya mengindikasikan adanya efek *persistence* atau keterlanjutan emisi dari waktu ke waktu. Variabel jumlah penduduk berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂ baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang, dengan koefisien jangka panjang yang lebih besar. Sementara itu, GDP per kapita berpengaruh positif dan signifikan dalam jangka pendek, namun tidak signifikan dalam jangka panjang. Di sisi lain, intensitas energi berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂, dengan koefisien jangka panjang sebesar 1,0781. Hasil ini konsisten dengan kerangka STIRPAT model, yang menunjukkan bahwa faktor teknologi dapat memperkuat pengaruh populasi dan kemakmuran terhadap dampak lingkungan.

Kata kunci: Emisi CO₂, OECD, STIRPAT, Generalized Method of Moments

ABSTRACT

Determinants of CO₂ Emissions in OECD Countries: A STIRPAT model Approach Using Dynamic Panel Data Estimation with Generalized Method of Moments.

By

Esha Galang Gati Mahendra

This study aims to examine the effects of several independent variables, namely population, GDP per capita, and particularly energy intensity, on the increase in CO₂ emissions in OECD countries. The research focuses on analyzing the role of technology, proxied by energy intensity, within the framework of the STIRPAT model, and its influence on carbon dioxide (CO₂) emissions. The data used in this study are panel data covering the period 2010-2022 for 38 OECD member countries. The method employed in this research is dynamic panel regression using the Generalized Method of Moments, while the selected model to explain the relationship between the independent and dependent variables is the System GMM (Sys-GMM) model. The results show that the lagged CO₂ emissions variable (lag 1) has a positive effect on CO₂ emissions in the subsequent period, indicating the presence of persistence in emissions over time. The population variable has a positive and significant effect on CO₂ emissions in both the short and long run, with a larger long-run coefficient. Meanwhile, GDP per capita has a positive and significant effect in the short run but becomes insignificant in the long run. On the other hand, energy intensity has a positive and significant effect on CO₂ emissions, with a long-run coefficient of 1.0781. These findings are consistent with the STIRPAT framework, which suggests that technological factors can amplify the effects of population and affluence on environmental impacts.

Keyword: CO₂ emissions, OECD, STIRPAT, Generalized Method of Moments.

**Determinan Emisi CO₂ di negara-negara OECD: Pendekatan STIRPAT
dengan Estimasi Dynamic Panel Data Generalized Method of Moments
(GMM)**

Oleh

ESHA GALANG GATI MAHENDRA

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER EKONOMI**

Pada

**Program Studi Magister Ilmu Ekonomi
Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER EKONOMI
FAKULTAS EKONOMI DAN BISNIS
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

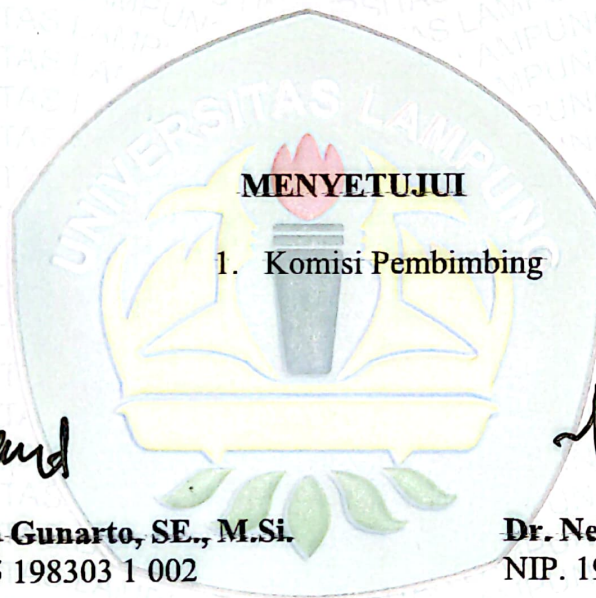
Judul Tesis : **Determinan Emisi CO₂ di negara-negara OECD: Pendekatan STIRPAT dengan Estimasi Dynamic Panel Data Generalized Method of Moments (GMM)**

Nama Mahasiswa : **Esha Galang Gati Mahendra**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2421021004**

Program Studi : **Magister Ilmu Ekonomi**

Fakultas : **Ekonomi dan Bisnis**



Prof. Dr. Toto Gunarto, SE., M.Si.
NIP. 19560325 198303 1 002



Dr. Neli Aida, S.E., M.Si.
NIP. 19631215 198903 2 002

MENGETAHUI

2. **Ketua Program Studi Magister Ilmu Ekonomi**



Dr. Asih Murwiati, S.E., M.E.
NIP. 19740410 200812 2 001

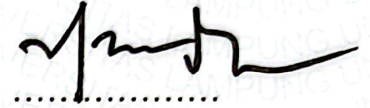
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Prof. Dr. Toto Gunarto, SE., M.Si.**



Sekretaris : **Dr. Neli Aida, S.E., M.Si.**



Penguji I : **Dr. Asih Murwiati, S.E., M.E.**



Penguji II : **Dr. Dedy Yuliawan, S.E., M.Si.**



2. Dekan Fakultas Ekonomi dan Bisnis

Prof. Dr. Nairobi, S.E., M.Si.
NIP. 19660621 199003 1 003

3. Direktur Program Pascasarjana

Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP. 19640326 198902 1 001

Tanggal Lulus Ujian : 19 Februari 2026

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa tesis ini disusun dan ditulis secara mandiri serta dengan menjunjung tinggi prinsip kejujuran akademik. Seluruh isi dalam tesis ini bukan merupakan hasil penjiplakan, baik sebagian maupun keseluruhan, dari karya orang lain tanpa menyebutkan sumber secara layak. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak sesuai dengan keadaan yang sebenarnya, maka saya bersedia menerima segala bentuk sanksi akademik sesuai dengan ketentuan dan peraturan yang berlaku.

Bandar Lampung, 31 Maret 2026



Esha Galang Gati Mahendra

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Kota Metro pada 7 November 1998 sebagai anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Fauzi Ahmad Mursalin dan Ibu Suprihatin. Penulis memiliki seorang saudara perempuan bernama Renita Maharani Fauzi dan seorang saudara laki-laki bernama Muhammad Ghani Albar.

Pendidikan formal penulis dimulai di TK Budi Utama dan diselesaikan pada tahun 2004. Penulis kemudian menempuh pendidikan di SD Negeri 2 Pajaresuk (2005-2011), SMP Negeri 1 Pringsewu (2011-2014), dan SMA Negeri 1 Pagelaran (2014-2017). Pada tahun 2017, penulis diterima sebagai mahasiswa Program Studi Ilmu Ekonomi Pembangunan, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) dengan konsentrasi Ekonomi Perencanaan, dan menyelesaikan pendidikan sarjana pada tahun 2023. Pada tahun 2024, penulis melanjutkan studi pada Program Magister Ilmu Ekonomi di Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Lampung.

Selama masa studi sarjana, penulis aktif dalam kegiatan kemahasiswaan sebagai anggota Himpunan Mahasiswa Ekonomi Pembangunan (HIMEPA) serta Pusat Informasi dan Konseling Mahasiswa Universitas Lampung (PIKM RAYA Unila). Pada tahun 2019, penulis mengikuti kegiatan Kuliah Kunjung Lapangan (KKL) ke beberapa institusi pemerintah, antara lain Bank Indonesia, Kementerian Keuangan, Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian, dan Badan Kebijakan Fiskal.

Pada tahun 2020, penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) Periode II di Desa Gemahripah, Kecamatan Pringsewu, Kabupaten Pringsewu selama 40 hari dan berkontribusi dalam pengembangan situs web desa sebagai bagian dari upaya pelayanan informasi publik selama masa pandemi Covid-19. Penulis juga memiliki pengalaman sebagai mitra Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Pringsewu dan terlibat dalam kegiatan Sensus Pertanian 2023 (ST2023) yang dilaksanakan secara serentak di seluruh Indonesia pada periode 1 Juni hingga 31 Juli 2023.

Menjelang akhir tahun 2023, penulis memperoleh gelar Sarjana Ekonomi dan Kembali melanjutkan pendidikan ke jenjang Magister Ilmu Ekonomi dengan program studi linier di Universitas Lampung pada tahun 2024. Pada tahun 2025, penulis mengikuti kegiatan *field trip* ke Vietnam, tepatnya ke Kota Hồ Chí Minh dengan mengunjungi VNU-HCM University of Economics and Law serta Environment for Development Vietnam, sebagai bagian dari pengayaan akademik dan wawasan internasional di bidang ekonomi.

PERSEMBAHAN

Dengan rasa syukur kepada Allah SWT atas rahmat dan ridho-Nya, karya ini
kupersembahkan untuk orang-orang yang kusayangi:

Kedua Orang Tuaku Tercinta

Ayah dan Ibunda tersayang, yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang,
dukungan, serta pengorbanan yang tiada henti dalam setiap langkah kehidupan
penulis. Kakak serta adik tercinta, yang selalu memberikan semangat, motivasi,
serta penghiburan dalam perjalanan penulis menyelesaikan studi ini.

Kakak dan adikku tersayang
Serta almamater tercinta Universitas Lampung

MOTTO

“Make the best use of what is in your power, and take the rest as it happens”.

-Epictetus, Discourses

“What determines your success isn't, “What do you want to enjoy?” The relevant question is, “What pain do you want to sustain?” The path to happiness is a path full of shitheaps and shame.”.

*-Mark Manson, The Subtle Art of Not Giving a F*ck*

“In the shadow of the death, seize the light of today”

-Esha Galang Gati Mahendra

SANWANCANA

Bismillāhirrahmānirrahīm

Assalāmu'alaikum warahmatullāhi wabarakātuh

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat, karunia, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan judul **“Determinan Emisi CO₂ di negara-negara OECD: Pendekatan STIRPAT dengan Estimasi Dynamic Panel Data Generalized Method of Moments (GMM)”** sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana Ekonomi pada Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Lampung.

Pengalaman pembelajaran yang penulis peroleh selama ini memberikan makna yang mendalam bahwa kemampuan dan pengetahuan penulis masih perlu terus dikembangkan. Penyusunan tesis ini tidak terlepas dari berbagai kendala, namun berkat bimbingan, dukungan, dan saran dari berbagai pihak, pada kesempatan ini penulis dengan tulus mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT, atas ketetapan dan kehendak-Nya, serta kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk berusaha dan berproses hingga tesis ini dapat diselesaikan.
2. Bapak Prof. Dr. Nairobi, S.E., M.Si., selaku Dekan Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Lampung.
3. Ibu Dr. Asih Murwiati, S.E., M.E., selaku Ketua Program Studi Magister Ilmu Ekonomi Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Lampung.
4. Prof. Dr. Toto Gunarto, SE., M.Si., selaku Dosen Pembimbing 1 penulis mengucapkan terima kasih atas kesediaan beliau dalam meluangkan waktu, tenaga, dan perhatian untuk memberikan bimbingan kepada penulis dengan penuh kesabaran. Berbagai bentuk dukungan, arahan, serta saran yang diberikan, disertai dengan motivasi yang luar biasa, sangat membantu penulis dalam menghadapi berbagai kendala selama proses penyusunan tesis ini, sehingga pada akhirnya tesis ini dapat penulis selesaikan dengan baik.
5. Dr. Neli Aida, S.E., M.Si., selaku Dosen Pembimbing 2 atas kesediaan beliau meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan kepada penulis dengan

penyuh kesabaran, dukungan, arahan, serta motivasi yang sangat berarti sehingga tesis ini dapat diselesaikan dengan baik.

6. Dr. Asih Murwiati, S.E., M.E., sebagai Dosen Penguji 1 yang senantiasa memberikan pengarahannya, masukan, dan saran, serta dukungan dan bantuan kepada penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
7. Dr. Dedy Yuliawan, S.E., M.Si., selaku Dosen Penguji 2 yang senantiasa memberi pengarahannya, kritik dan saran, serta dukungan dan bantuan kepada penulis dalam rangka menyelesaikan tesis ini.
8. Bapak dan Ibu tercinta, Bapak Fauzi Ahmad Mursalin dan Ibu Suprihatin, yang senantiasa tanpa henti memberikan doa, dukungan, perhatian, serta kasih sayang yang tulus dan terbaik kepada penulis dalam setiap langkah kehidupan dan proses penyelesaian tesis ini. Kakak tercinta, Renita Maharani Fauzi, yang selalu memberikan motivasi, nasihat, saran, serta doa dan dukungan yang berarti bagi penulis selama ini. Serta adik tercinta, Muhammad Ghani Albar, yang juga senantiasa memberikan doa, semangat, dan dukungan kepada penulis hingga tesis ini dapat diselesaikan.
9. Seluruh teman-teman Magister Ilmu Ekonomi Angkatan 2024 yang telah menemani dan selalu mendukung penulis selama masa pembelajaran maupun penulisan tesis.
10. Mba Ita dan seluruh staf dan karyawan di lingkungan Fakultas Ekonomi dan Bisnis maupun Universitas Lampung yang telah memberikan berbagai bentuk bantuan serta pelayanan selama perkuliahan.

Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih kepada diri sendiri atas ketekunan dan komitmen dalam menyelesaikan tesis ini. Penulis juga sangat menyadari bahwa tesis ini masih memiliki keterbatasan dan memerlukan penyempurnaan. Meskipun demikian, penulis berharap tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca. Penulis mendoakan agar seluruh dukungan, bimbingan, nasihat, dan doa yang telah diberikan kepada penulis mendapatkan balasan dari Allah SWT. Aamiin.

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	18
1.3. Tujuan Penelitian	18
1.4. Manfaat Penelitian	19
II. TINJAUAN PUSTAKA	20
2.1. Tinjauan Teoritis	20
2.1.1. Pembangunan Berkelanjutan	20
2.1.2. Emisi Karbon Dioksida (CO ₂)	23
2.1.3. Eksternalitas	24
2.1.4. Model IPAT dan STIRPAT	28
2.2. Penelitian Terdahulu	32
2.3. Kerangka Pemikiran.....	37
2.4. Hipotesis.....	38
III. METODE PENELITIAN	40
3.1. Jenis Data dan Ruang Lingkup Penelitian	40
3.2. Definisi Operasional Variabel.....	40
3.3. Metode Analisis	42
3.3.1. Regresi Data Panel Dinamis	42
3.4. Prosedur Analisis	44
3.4.1. Pemilihan Estimator GMM.....	45
3.4.2. Tahapan Pengujian Panel Dinamis GMM.....	46
3.4.3. Long-Run Coefficient	48
3.4.4. Pengujian Hipotesis	49

3.4.4. Keseimbangan Konvergen	51
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	52
4.1. Hasil	52
4.1.1. Uji Stasionaritas Data Panel.....	54
4.1.2. Uji Asumsi Klasik	55
4.1.3. Pengujian Endogenitas	59
4.1.4. Pengujian Model First Difference GMM (FD-GMM).....	63
4.1.5. Pengujian Model System GMM (Sys-GMM).....	66
4.1.6. Model Terpilih System GMM (SYS-GMM)	69
4.1.7. Pengujian Hipotesis	70
4.1.8. Keseimbangan Konvergen	70
4.2. Pembahasan.....	70
4.2.1. Hasil Estimasi Model Sys-GMM.....	70
4.2.2. Hubungan Independen Variabel terhadap Dependen Variabel.....	71
V. SIMPULAN DAN SARAN	85
5.1. Simpulan	85
5.2. Saran.....	87
DAFTAR PUSTAKA.....	91
LAMPIRAN.....	98

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 1. Total dan Kontribusi Emisi Anggota OECD 2022	5
Tabel 2. Penelitian Terdahulu	32
Tabel 3. Definisi Operasional Variabel	41
Tabel 4. Deskripsi Statistik	52
Tabel 5. Uji Akar Unit LLC	54
Tabel 6. Uji Signifikansi Parameter Individual (Uji-t).....	70
Tabel 7. Uji Signifikansi Simultan (Uji-F).....	70

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 1. Total Emisi CO ₂ Dunia 2013-2022	4
Gambar 2. Persentase Konsumsi Energi Dunia 2022	7
Gambar 3. Anggota OECD dengan Persentase Renewable Energy Tertinggi 2022	8
Gambar 4. Anggota OECD dengan Persentase Intensitas Energi Tertinggi 2022	10
Gambar 5. Penduduk Dunia 2022	12
Gambar 6. Negara Anggota OECD dengan Populasi Tertinggi	13
Gambar 7. GDP Per kapita Anggota OECD 2022	15
Gambar 8. Paradigma Pembangunan	22
Gambar 9. Eksternalitas Produksi Negatif	25
Gambar 10. Eksternalitas Konsumsi Negatif	27
Gambar 11. Kerangka Pemikiran	37
Gambar 12. Uji Normalitas Sebelum Transformasi Data	55
Gambar 13. Plot Kuantil-Kuantil Variabel Sebelum Transformasi Data	56
Gambar 14. Plot Kuantil-Kuantil Variabel Setelah Transformasi Data	58
Gambar 15. Uji Normalitas Setelah Transformasi Data	59
Gambar 16. Uji Multikolinieritas	59
Gambar 17. Uji Endogenitas Jumlah Penduduk	60
Gambar 18. Uji Endogenitas GDP Per kapita	60
Gambar 19. Uji Endogenitas Intensitas Energi	60
Gambar 20. Uji. Weak Instrument	62
Gambar 21. Uji Overditenfying Restrictions	62
Gambar 22. Model FD-GMM no Robust Standard Errors	63
Gambar 23. Hasil Uji Sargan FD-GMM	63
Gambar 24. Model FD-GMM Robust Standard Errors	64

Gambar 25. Uji Hansen FD-GMM	64
Gambar 26. Uji Arellano-Bond FD-GMM.....	65
Gambar 27. Uji Ketidak-biasan FD-GMM	65
Gambar 28. Model Sys-GMM no Robust Standard Errors.....	66
Gambar 29. Uji Sargan Sys-GMM.....	66
Gambar 30. Model Sys-GMM Robust Standard Errors.....	67
Gambar 31. Uji Hansen Sys-GMM.....	67
Gambar 32. Uji Arellano-Bond Sys-GMM.....	68
Gambar 33. Uji Ketidak-biasan Sys-GMM	68
Gambar 34. Model Terpilih Sys-GMM.....	69
Gambar 35. Model Jangka Panjang	69
Gambar 36. Analogi kerangka Solow untuk menjelaskan Steady State Emisi	72
Gambar 37. Environmental Kuznets Curve	78

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pembangunan berkelanjutan adalah sebagai upaya manusia untuk memperbaiki mutu kehidupan dengan tetap berusaha tidak melampaui ekosistem yang mendukung kehidupannya. Terdapat berbagai definisi mengenai pembangunan berkelanjutan, namun yang paling umum digunakan adalah definisi dari The Brundtland Commission. Definisi tersebut menjelaskan bahwa pembangunan berkelanjutan adalah suatu proses perubahan yang memastikan bahwa eksploitasi sumber daya alam, investasi, pemanfaatan teknologi, dan perubahan institusi dilakukan dengan mempertimbangkan kebutuhan generasi mendatang, sejalan dengan pemenuhan kebutuhan generasi saat ini (Keeble, 1988).

Dewasa ini masalah pembangunan berkelanjutan telah dijadikan sebagai isu penting yang perlu terus di sosialisasikan ditengah masyarakat (Rahadian, 2016). Namun, faktanya, aktivitas ekonomi sering kali mengorbankan lingkungan, terutama melalui peningkatan emisi karbon. Faktor-faktor seperti industrialisasi, konsumsi energi fosil, dan pertumbuhan penduduk menjadi penyumbang utama peningkatan emisi karbon global. Menurut Steward & Krier (1978), krisis lingkungan yang sudah berskala global dapat dikelompokkan ke dalam tiga hal: pertama, pencemaran lingkungan (pollution); kedua, pemanfaatan lahan yang salah (land mis-use); ketiga, eksploitasi sumberdaya alam yang menyebabkan habisnya sumberdaya (natural resource depletion).

Adapun eksternalitas yang merupakan konsep penting dalam ekonomi, menurut David (2010) eksternalitas adalah biaya atau manfaat dari transaksi pasar yang tidak tercermin dalam harga. Eksternalitas terjadi ketika pihak ketiga (selain pembeli atau penjual barang) terkena dampak produksi atau konsumsi barang tersebut.

Eksternalitas tersebut dapat memberikan dampak positif seperti inovasi teknologi, atau dampak negatif seperti polusi udara. Sehubungan dengan hal tersebut, pengaruh eksternal yang negatif, seperti pencemaran lingkungan, seringkali mengemuka. Eksternalitas negatif dalam kegiatan ekonomi dapat mengakibatkan kerugian bagi masyarakat secara keseluruhan dan lingkungan hidup yang tidak diperhitungkan dalam keputusan ekonomi individu. Pada konteks perekonomian suatu negara, hal ini bisa menurunkan produktivitas karena masyarakat menjadi sakit, biaya kesehatan meningkat, dan lingkungan yang rusak membuat sumber daya alam berkurang. Jika dampak negatif seperti polusi atau kerusakan alam tidak dikendalikan, maka kualitas lingkungan menurun, sehingga ekonomi jangka panjang tidak stabil. Dengan kata lain, eksternalitas negatif membuat pembangunan berkelanjutan sulit tercapai.

Sebagai respons terhadap krisis iklim yang dipicu oleh peningkatan emisi CO₂, negara-negara di dunia telah mengimplementasikan berbagai kebijakan untuk menekan laju kerusakan lingkungan. Kekhawatiran terhadap dampak eksternalitas perubahan iklim telah menjadi pendorong utama lahirnya berbagai perjanjian iklim internasional. Protokol Kyoto yang disepakati pada tahun 1997 merupakan perjanjian pertama yang secara hukum mengikat negara-negara maju untuk menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK). Setelah berakhirnya periode pertama Protokol Kyoto, Konferensi ke-15 (COP15) di Kopenhagen pada tahun 2009 berupaya menyusun kerangka lanjutan.

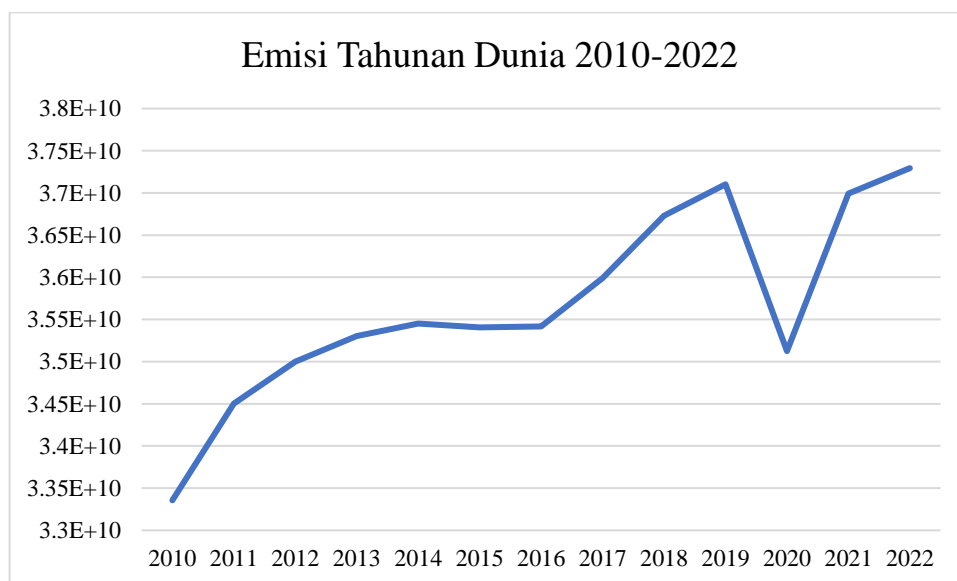
Meskipun tidak memiliki kekuatan hukum, Copenhagen Accord menetapkan target pembatasan kenaikan suhu global di bawah 2°C dan mencantumkan komitmen dari berbagai kawasan, seperti Uni Eropa yang menyatakan akan mengurangi emisi setidaknya sebesar 20% dari tingkat emisi tahun 1990 hingga tahun 2020, yang dapat ditingkatkan menjadi 30% apabila negara maju lainnya turut berkomitmen. Proses negosiasi terus berlanjut hingga akhirnya tercapai Paris Agreement dalam COP21 tahun 2015. Perjanjian Paris ini ditandatangani dan diratifikasi dengan cepat oleh hampir seluruh anggota UNFCCC, yaitu sebanyak 195 negara beserta Uni Eropa, sehingga menjadikannya sebagai perjanjian iklim berskala global yang bersifat mengikat secara hukum. Paris Agreement menggantikan kerangka kerja

Kyoto dan Kopenhagen dengan pendekatan kontribusi nasional (Nationally Determined Contributions/NDC) dari masing-masing negara, serta menargetkan pembatasan kenaikan suhu global agar tetap “well below 2°C”. NDC sendiri ialah kontribusi yang ditetapkan secara nasional oleh masing-masing negara sebagai komitmen sukarela untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan mengatasi perubahan iklim, sesuai dengan Perjanjian Paris.

Meskipun *Paris Agreement* telah diberlakukan sebagai kerangka kerja global untuk mengendalikan perubahan iklim, kenyataannya, Eropa terus mengalami fenomena cuaca ekstrem yang mengkhawatirkan. Musim panas tahun 2022 tercatat sebagai yang terpanas dalam sejarah benua tersebut, dengan suhu yang melampaui rekor sebelumnya. Studi yang diterbitkan dalam *Nature Medicine* mengungkapkan bahwa sepanjang periode 30 Mei hingga 4 September 2022, terjadi sekitar 61.672 kematian yang terkait dengan gelombang panas di 35 negara Eropa, dengan korban tertinggi tercatat di Italia, Spanyol, dan Jerman. Fenomena ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat komitmen internasional untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, dampak langsung dari perubahan iklim masih dirasakan secara signifikan di kawasan ini (Ballester et al., 2023).

Kondisi ini terus berlanjut hingga musim panas tahun 2023, Eropa kembali dilanda gelombang panas ekstrem yang dikenal dengan sebutan *Cerberus*. Gelombang panas ini menyebabkan suhu mencapai lebih dari 45°C di beberapa negara seperti Italia, Spanyol, dan Yunani, memicu kebakaran hutan besar-besaran dan membebani sistem kesehatan masyarakat. Sepanjang tahun 2023, diperkirakan terjadi sekitar 47.690 kematian yang terkait dengan panas di Eropa, menjadikannya tahun dengan angka kematian tertinggi kedua akibat panas sejak 2015 (Ballester et al., 2023). Kejadian beruntun ini menyoroti bahwa meskipun kerangka kebijakan seperti *Paris Agreement* telah dirancang untuk mengendalikan pemanasan global, realitas empiris memperlihatkan bahwa mitigasi dan adaptasi yang ada saat ini belum mampu memberikan perlindungan memadai terhadap intensifikasi cuaca ekstrem di kawasan Eropa.

Kondisi nyata tersebut menimbulkan keraguan terhadap efektivitas Paris Agreement dalam praktik. Berbagai analisis menunjukkan target dan kebijakan saat ini masih jauh dari cukup. OECD (2024) melaporkan bahwa NDC gabungan negara-negara besar justru hanya menargetkan penurunan emisi kolektif 14% pada 2030 dibanding level 2022 jauh di bawah 43% yang diperlukan untuk memenuhi target 1,5°C menurut IPCC (OECD, 2024). Sementara itu 110 negara telah menjanjikan *net-zero* di tahun 2050, hanya 27 negara plus Uni Eropa (sekitar 16% emisi global) yang mengabadikan janji tersebut dalam bentuk hukum (OECD, 2024). Data Our World in Data juga memperkirakan bahwa kebijakan saat ini hanya mencegah pemanasan global sekitar 2,7°C (jauh di atas target Paris) (Ritchie et al, 2023). Dengan demikian, meski Paris Agreement menjadi tonggak hukum penting, tantangan implementasi di lapangan (termasuk politis, ekonomi, dan sosial) masih besar. Pertanyaan penting muncul, sejauh mana perjanjian iklim ini benar-benar mendisrupsi tren emisi di negara-negara OECD, dan langkah apa yang diperlukan untuk menjembatani gap ambisi yang tersisa.



Sumber : Global Carbon Project, 2024

Gambar 1. Total Emisi CO₂ Dunia 2013-2022

Fenomena lingkungan ekstrem yang ditandai oleh gelombang panas Cerberus tersebut menggarisbawahi bahwa kenaikan emisi karbon sebagai penyumbang utama pemanasan global terus menjadi faktor penentu frekuensi dan intensitas suhu ekstrem, sehingga penting untuk menelaah tren total emisi CO₂ global. Berdasarkan gambar total emisi CO₂ global di atas diketahui secara umum bahwa, emisi karbon dunia menunjukkan tren yang meningkat dari tahun 2010 hingga 2022, meskipun terdapat beberapa fluktuasi penting selama periode tersebut. Pada awal periode, emisi meningkat secara konsisten dari sekitar 33,35 miliar ton pada tahun 2010 menjadi sekitar 35,45 miliar ton pada tahun 2014. Kenaikan ini mencerminkan pertumbuhan ekonomi global yang pesat, terutama dari negara berkembang yang masih sangat bergantung pada energi fosil. Setelah tahun 2014 hingga 2016, pertumbuhan emisi cenderung stagnan, yang mungkin disebabkan oleh peningkatan efisiensi energi, transisi awal ke sumber energi terbarukan di beberapa negara maju, serta kebijakan lingkungan yang mulai diterapkan secara lebih luas. Namun, pada tahun 2017 hingga 2019, emisi kembali mengalami peningkatan tajam dan mencapai puncaknya sekitar 37,10 miliar ton, yang kemungkinan besar disebabkan oleh pemulihan ekonomi dan konsumsi energi yang meningkat. Tahun 2020 menunjukkan penurunan emisi yang signifikan menjadi 35,12 miliar ton, yang selaras dengan dampak pandemi COVID-19 terhadap aktivitas ekonomi global, transportasi, dan industri. Ini merupakan penurunan paling mencolok dalam periode yang ditampilkan. Namun, tren tersebut tidak bertahan lama. Emisi kembali meningkat pada tahun 2021 dan 2022. Pada 2022 emisi CO₂ menjadi 37,29 miliar ton

Tabel 1. Total dan Kontribusi Emisi Anggota OECD 2022

Negara	Total Emisi CO ₂ 2022	Kontribusi Terhadap Total CO ₂ OECD	Kontribusi Terhadap Total CO ₂ Dunia
United States	5078871000	42.78	13.62
Japan	1032686800	8.70	2.77
Germany	671471550	5.66	1.80
Korea Republic	602092400	5.07	1.61
Canada	547943900	4.62	1.47
Mexico	511971970	4.31	1.37
Turkiye	435684600	3.67	1.17
Australia	392279260	3.30	1.05

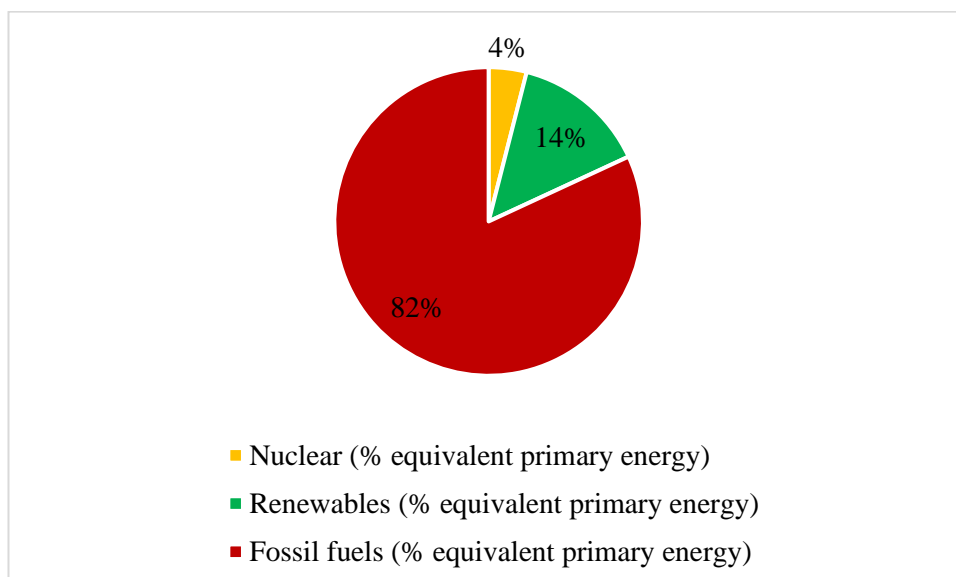
Italy	338097280	2.85	0.91
Poland	323117300	2.72	0.87
United Kingdom	318654370	2.68	0.85
France	297533920	2.51	0.80
Spain	245613820	2.07	0.66
Netherlands	125358230	1.06	0.34
Colombia	99717870	0.84	0.27
Czechia	97969300	0.83	0.26
Belgium	89605360	0.75	0.24
Chile	84377720	0.71	0.23
Austria	61488424	0.52	0.16
Greece	59662764	0.50	0.16
Israel	56118090	0.47	0.15
Hungary	44353616	0.37	0.12
Portugal	41605030	0.35	0.11
Norway	40808000	0.34	0.11
Ireland	38784012	0.33	0.10
Sweden	38050544	0.32	0.10
Finland	36163000	0.30	0.10
Switzerland	35380164	0.30	0.09
Slovakia	34151680	0.29	0.09
New Zealand	32211814	0.27	0.09
Slovenia	12714800	0.11	0.03
Lithuania	12667216	0.11	0.03
Estonia	10311845	0.09	0.03
Costa Rica	7888694	0.07	0.02
Luxembourg	7524108	0.06	0.02
Latvia	6591454	0.06	0.02
Iceland	3542503	0.03	0.01
OECD	11873064408	100	31.83653472

Sumber : Global Carbon Project, 2024

Berdasarkan kontribusi masing-masing negara dari data 2022, diketahui bahwa United States menempati posisi tertinggi sebagai penyumbang emisi terbesar. Dengan total emisi mencapai 5,7 miliar ton, negara ini menyumbang sekitar 42,78% dari total emisi CO₂ negara-negara OECD dan berkontribusi sebesar 13,62% terhadap total emisi CO₂ dunia. Hal ini membuktikan bahwa negara United States memiliki dampak yang sangat besar terhadap perubahan iklim, baik di tingkat regional maupun global. Di sisi lain, Islandia menjadi negara dengan emisi CO₂ terendah, hanya sebesar 354.503 ton. Kontribusinya terhadap total emisi OECD

sangat kecil, yaitu 0,03%, dan hanya 0,01% terhadap total emisi global. Negara-negara seperti Latvia dan Luxembourg juga menunjukkan angka emisi yang sangat rendah. Sedangkan berdasarkan kontribusi OECD terhadap emisi dunia, total emisi karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan oleh negara-negara anggota OECD mencapai sekitar 11,87 miliar ton, yang setara dengan 31,84% dari total emisi dunia. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun jumlah negara anggota OECD relatif kecil dibandingkan dengan jumlah seluruh negara di dunia, kontribusinya terhadap emisi global sangat signifikan. Amerika Serikat, sebagai anggota OECD terbesar dalam hal emisi, menyumbang sekitar 42,78% dari total emisi CO₂ OECD atau sekitar 13,62% dari total emisi dunia, diikuti oleh Jepang, Jerman, dan Korea Selatan.

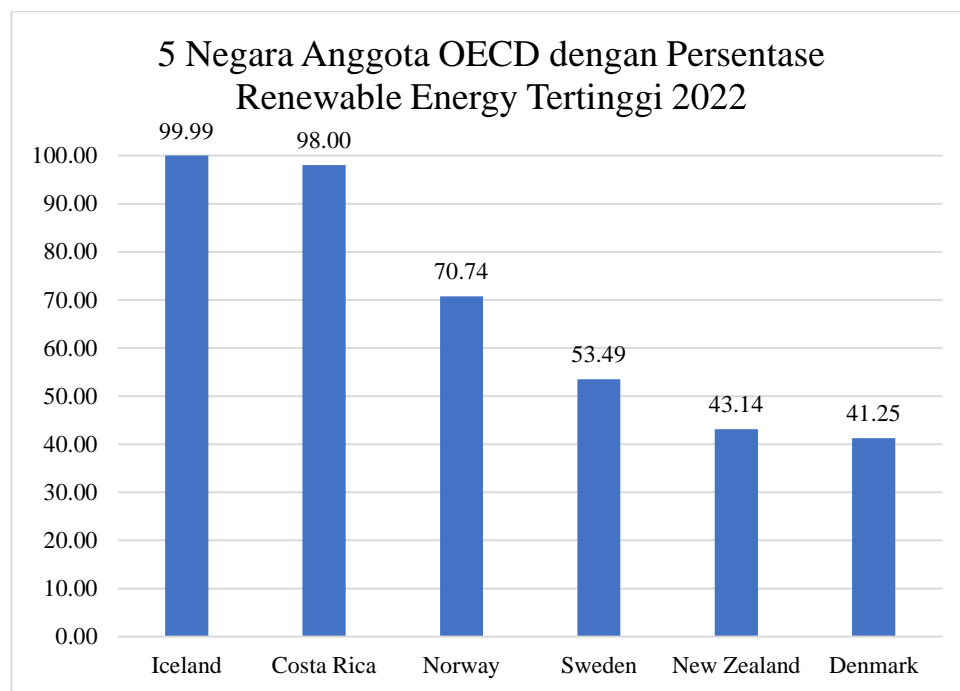
Sebagai upaya mengurangi tingkat emisi karbon dioksida, maka adanya transformasi energi dari sumber energi non-terbarukan seperti batubara dan minyak bumi ke energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan hidro juga menjadi kunci dalam mengurangi emisi karbon. Transformasi ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada energi fosil, tetapi juga mendorong inovasi teknologi yang cenderung memiliki tingkat emisi karbon yang lebih rendah, sekaligus mencapai pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan.



Sumber : Energy Institute, 2025

Gambar 2. Persentase Konsumsi Energi Dunia 2022

Bersumber dari data World Bank, diketahui bahwa persentase konsumsi energi dunia pada tahun 2022, terlihat bahwa 82% dari energi yang digunakan secara global masih didominasi oleh bahan bakar fosil. Hal ini mencerminkan ketergantungan besar dunia terhadap sumber energi yang tidak terbarukan seperti minyak, gas, dan batu bara. Sementara itu, energi terbarukan yang mencakup sumber-sumber seperti angin, matahari, dan biomassa menyumbang sekitar 14% dari total konsumsi energi global. Ini menunjukkan peningkatan perhatian terhadap sumber energi yang lebih bersih, meskipun persentasenya masih relatif kecil dibandingkan bahan bakar fosil. Terakhir, energi yang dihasilkan dari nuklir hanya menyumbang 4%, yang menegaskan bahwa energi nuklir masih memiliki peran yang cukup terbatas dalam kontribusi terhadap kebutuhan energi dunia.



Sumber : Energy Institute, 2025

Gambar 3. Anggota OECD dengan Persentase Renewable Energy Tertinggi 2022

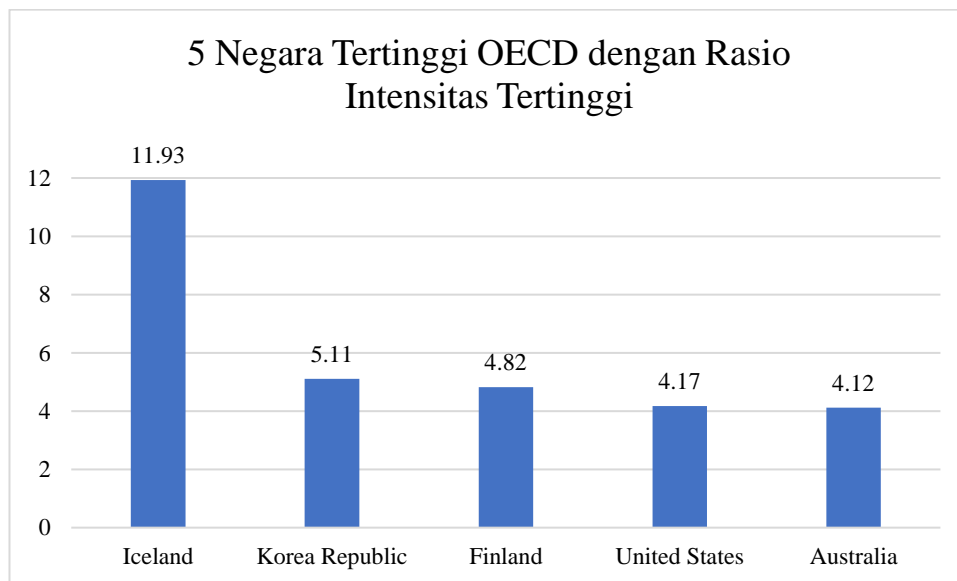
Masih dari World Bank, diketahui bahwa Islandia sebagai negara yang paling unggul dalam penggunaan energi terbarukan. 99,99% konsumsi listriknya berasal dari sumber energi terbarukan, Islandia hampir sepenuhnya tidak bergantung pada

bahan bakar fosil. Negara ini memanfaatkan energi geotermal dan hidroelektrik secara maksimal, yang melimpah di negara tersebut karena letak geografis dan aktivitas vulkaniknya. Costa Rica juga sangat mengandalkan energi terbarukan, dengan 98% konsumsi listriknya berasal dari sumber terbarukan. Negara ini merupakan salah satu pelopor dalam pengembangan energi bersih di Amerika Latin, menggunakan tenaga air, geotermal, angin, dan biomassa untuk memasok sebagian besar kebutuhan energinya. Sedangkan Norwegia, meskipun negara ini merupakan produsen minyak besar, negara ini mengandalkan energi terbarukan untuk 96,52% konsumsi listriknya, terutama melalui tenaga hidro. Hal ini menunjukkan bagaimana Norwegia berhasil mengembangkan infrastruktur energi terbarukan yang kuat, meskipun tetap menjadi eksportir minyak yang besar. Kemudian ada Swedia dengan 53,49% listrik yang berasal dari energi terbarukan, Swedia menunjukkan komitmen kuat terhadap pengurangan ketergantungan pada energi fosil dan pengembangan energi hijau. Denmark juga menjadi salah satu negara yang unggul dalam konsumsi energi terbarukan, dengan 41,25% dari konsumsi listriknya berasal dari sumber terbarukan. Penggunaan energi terbarukan yang tinggi, terutama tenaga air dan bioenergi, mencerminkan ambisi Swedia untuk mencapai netralitas karbon.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, Huylo et al (2025) Penggunaan energi dengan sumber terbarukan mengurangi emisi hingga 45,4%. Hal ini menunjukkan pengaruh yang negatif dan signifikan terhadap perubahan emisi karbon dioksida. Hasil ini didukung juga oleh Justice et al (2024) dan Tsandra et al (2023), konsumsi energi terbarukan memiliki pengaruh terhadap pengurangan emisi karbon. Hal ini menunjukkan bahwa meningkatnya penggunaan energi dengan sumber terbarukan akan menurunkan emisi karbon dioksida di negara-negara industri baru.

Selain faktor teknologi yang maju, negara yang beralih ke energi terbarukan secara signifikan dapat mengurangi emisi karbon mereka dikarenakan memiliki intensitas energi relatif rendah dan memanfaatkan sumber energi bersih dalam jumlah besar, cenderung memiliki tingkat emisi karbon yang lebih rendah dibandingkan negara yang bergantung pada bahan bakar fosil. Intensitas energi memainkan peran penting dalam dinamika emisi karbon. Intensitas energi, yang mengukur seberapa efisien

energi digunakan dalam perekonomian, juga merupakan faktor kunci dalam mengurangi emisi karbon. Intensitas energi yang rendah menunjukkan bahwa suatu negara mampu menghasilkan output ekonomi yang lebih tinggi dengan menggunakan energi yang lebih sedikit. Hal ini biasanya dicapai melalui inovasi dan teknologi ramah lingkungan yang meningkatkan efisiensi energi. Dengan demikian, intensitas energi yang rendah dapat menjadi indikator keberhasilan dalam mengurangi emisi karbon, sekaligus mencerminkan kemajuan dalam penerapan teknologi hijau.



Sumber : World Bank, 2022

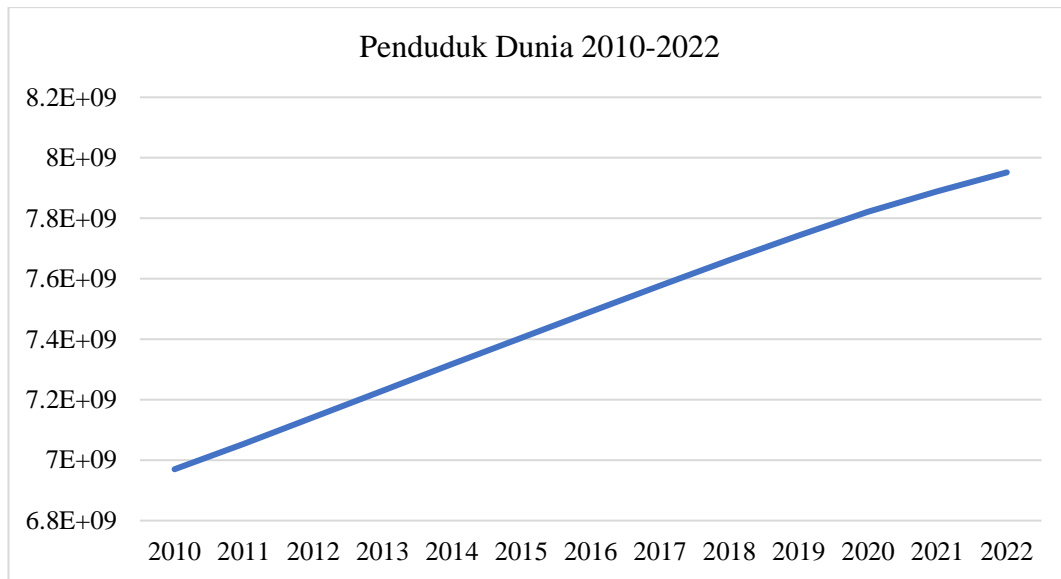
Gambar 4. Anggota OECD dengan Persentase Intensitas Energi Tertinggi 2022

Berdasarkan World Bank, data intensitas energi tahun 2022 menunjukkan variasi signifikan antar negara. Islandia mencatat intensitas energi tertinggi sebesar 11,93, jauh lebih tinggi dibandingkan negara lain, kemungkinan karena penggunaan energi untuk industri berat dan iklim dingin yang meningkatkan kebutuhan energi. Korea Selatan 5,11, Finlandia 4,82, dan Australia 4,12. Walaupun United States sebelumnya dijelaskan adalah negara penyumbang emisi terbanyak jika dibandingkan dengan negara anggota lainnya, namun United States termasuk dalam negara anggota OECD yang memiliki nilai rasio intensitas energi tinggi yaitu 4,17.

Adapun menurut hasil penelitian dari Marra et al (2024), Intensitas energi memiliki dampak positif, intensitas energi menyebabkan emisi yang lebih rendah dan memacu perubahan teknologi/struktural. Hal ini didukung oleh penelitian Du et al (2024) dan Wei & Lahiri (2022) dimana intensitas energi berpengaruh dalam mengurangi emisi karbon dan menjadi indikator pengendalian emisi karbon di sector manufaktur. Seiring dengan meningkatnya jumlah energi yang dikonsumsi untuk menghasilkan satu unit GDP (efisiensi energi menurun), tingkat emisi CO₂ juga meningkat, dan sebaliknya.

Faktor lain seperti pertumbuhan penduduk, terutama di wilayah perkotaan, merupakan salah satu faktor yang signifikan memengaruhi peningkatan emisi karbon. Urbanisasi yang cepat menyebabkan peningkatan konsumsi energi dan sumber daya alam, yang pada gilirannya meningkatkan emisi karbon. Penduduk perkotaan cenderung memiliki pola konsumsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan penduduk pedesaan, seperti penggunaan transportasi bermotor, listrik, dan barang-barang konsumsi yang memerlukan energi intensif. Hal ini menciptakan tekanan besar pada lingkungan, terutama dalam hal emisi karbon. Oleh karena itu, pertumbuhan penduduk perkotaan tidak hanya menjadi tantangan dalam hal kesejahteraan sosial, tetapi juga dalam upaya mengurangi dampak lingkungan.

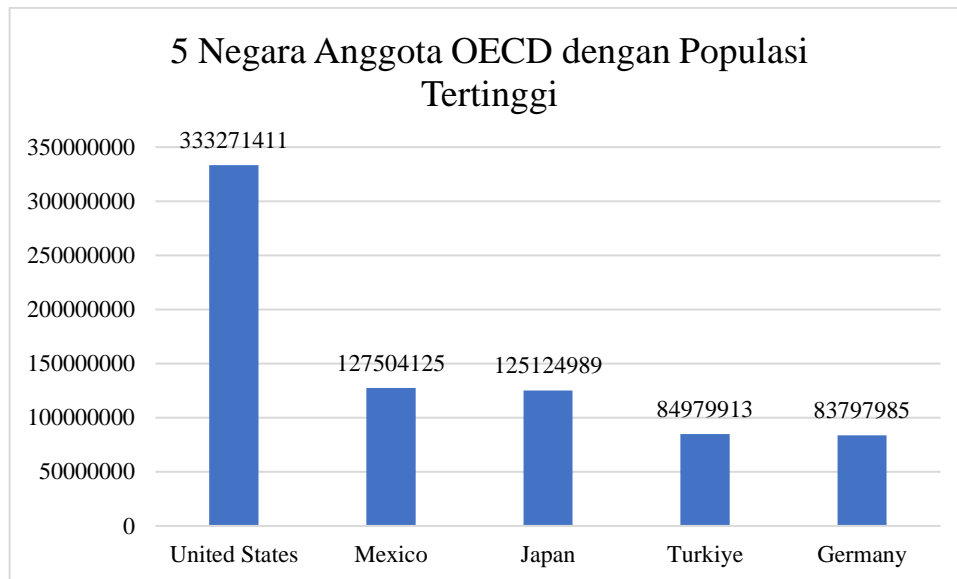
Adapun berdasarkan data World Bank diketahui bahwa pada 2010-2022 terjadi kenaikan total jumlah penduduk dunia yang signifikan.



Sumber : World Bank, 2024

Gambar 5. Penduduk Dunia 2022

Berdasarkan data jumlah penduduk dunia dari tahun 2010 hingga 2022, terlihat adanya tren pertumbuhan populasi global yang berlangsung secara konsisten setiap tahunnya. Pada tahun 2010, jumlah penduduk dunia tercatat sebesar 6,97 miliar jiwa dan meningkat menjadi 7,95 miliar jiwa pada tahun 2022. Secara keseluruhan, terjadi penambahan populasi sekitar 981 juta jiwa dalam kurun waktu dua belas tahun, yang mencerminkan rata-rata pertumbuhan tahunan sekitar 81 juta jiwa.



Sumber : World Bank, 2024

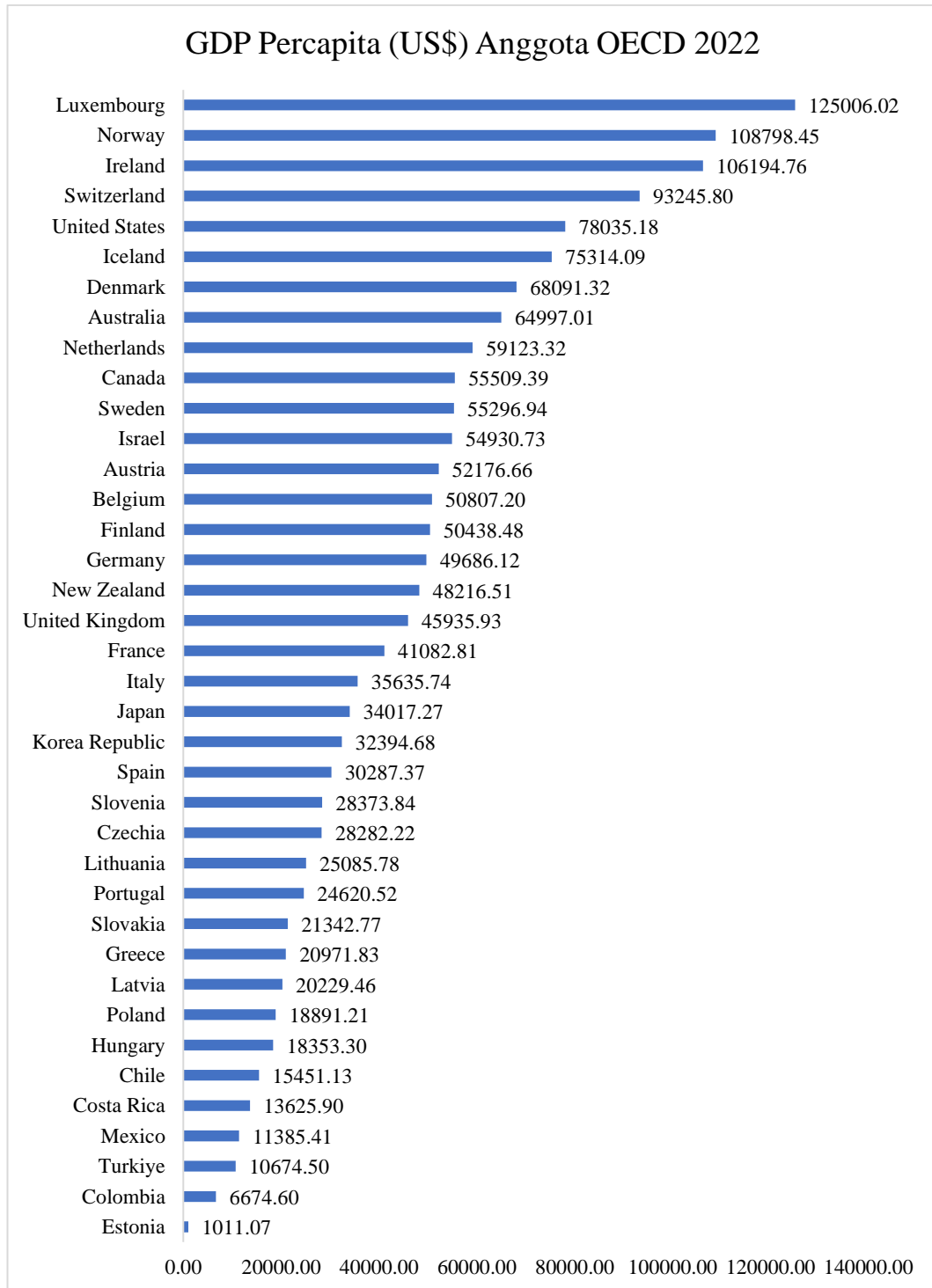
Gambar 6. Negara Anggota OECD dengan Populasi Tertinggi

Selanjutnya apa berdasarkan data jumlah populasi dari lima negara anggota OECD dengan populasi tertinggi diketahui bahwa, United States mencatat jumlah penduduk tertinggi yaitu sebesar 333.271.411 jiwa, disusul oleh Mexico (127.504.125), Japan (125.124.989), Turkiye (84.979.913), dan Germany (83.797.985). Perbedaan jumlah penduduk ini tidak hanya mencerminkan dinamika demografi dan struktur sosial-ekonomi masing-masing negara, tetapi juga berpotensi memengaruhi besarnya kontribusi terhadap emisi karbon dioksida (CO₂). Dalam konteks global, jumlah populasi yang tinggi sering kali berkorelasi dengan meningkatnya aktivitas ekonomi, konsumsi energi, dan mobilitas masyarakat faktor-faktor yang secara langsung maupun tidak langsung berkontribusi terhadap emisi CO₂. Sebagai negara dengan populasi terbesar dalam daftar ini, United States juga dikenal sebagai salah satu penghasil emisi CO₂ tertinggi di dunia. Hal ini didorong oleh tingginya tingkat industrialisasi, konsumsi energi berbasis fosil, serta pola konsumsi masyarakat. Sementara itu, negara seperti Japan dan Germany meskipun memiliki jumlah penduduk lebih rendah, tetap memberikan kontribusi signifikan terhadap emisi global karena merupakan negara maju dengan sektor industri dan transportasi yang padat energi. Di sisi lain, Mexico dan Turkiye memiliki tingkat emisi yang cenderung lebih rendah per kapita, namun

tetap relevan secara absolut karena ukuran populasi mereka yang besar dan meningkatnya industrialisasi.

Sebuah hasil dari penelitian Cristy & Sakti (2022) diketahui bahwa jumlah penduduk memiliki pengaruh positif dan signifikan terhadap Peningkatan jumlah emisi karbon di kawasan high income countries ASEAN pada periode 1998-2018. Hasil ini didukung oleh penelitian Bui Minh et al (2023) dan Ochi & Saidi (2024) yang juga meneliti mengenai pengaruh hubungan penduduk terhadap emisi karbon didapatkan hasil bahwa penduduk mempunyai pengaruh positif dan signifikan terhadap gas emisi karbon dioksida. Hal tersebut disebabkan ketika terjadi pertumbuhan jumlah penduduk tentu akan mendorong semakin banyaknya masyarakat atau manusia yang menggunakan sumber daya yang pembuangannya dapat mengakibatkan degradasi lingkungan yang lebih tinggi. Meningkatnya penduduk manusia akan mendorong dibukannya lahan hutan untuk permukiman, hingga semakin banyaknya pemakaian peralatan yang mengandung CO₂, akibatnya degradasi lingkungan semakin tinggi, hal tersebut terlihat dengan semakin tingginya kadar poluasi udara di Indonesia (I. Sari & Karimi, 2023)

Selain indikator penduduk seperti jumlah penduduk, GDP per kapita juga memiliki pengaruh yang kompleks terhadap emisi karbon. Teori Environmental Kuznets Curve (EKC) menjelaskan bahwa pada tahap awal pertumbuhan ekonomi, peningkatan GDP per kapita cenderung meningkatkan emisi karbon karena aktivitas industri dan konsumsi energi yang tinggi. Namun, pada tahap tertentu, ketika pendapatan per kapita mencapai tingkat yang lebih tinggi, masyarakat cenderung lebih peduli terhadap lingkungan. Hal ini mendorong adopsi teknologi ramah lingkungan dan peralihan ke energi terbarukan, yang pada akhirnya dapat mengurangi emisi karbon.



Sumber : World Bank, 2024

Gambar 7. GDP Per kapita Anggota OECD 2022

Berdasarkan data GDP per kapita tahun 2022 untuk negara-negara anggota OECD dari World Bank, menunjukkan variasi yang signifikan dalam tingkat kemakmuran

ekonomi antar negara. Negara dengan GDP per kapita tertinggi adalah Luxembourg, mencapai sekitar 125.006 USD, diikuti oleh Norwegia (108.798 USD) dan Irlandia (106.194 USD). Negara-negara seperti Swiss, Amerika Serikat, dan Islandia juga mencatat angka tinggi, di atas 75.000 USD, mencerminkan standar hidup yang sangat tinggi. Di tingkat menengah, terdapat negara seperti Jerman (49.686 USD), Kanada (55.509 USD), Australia (64.997 USD), dan Swedia (55.296 USD). Sementara itu, beberapa negara anggota OECD lainnya memiliki GDP per kapita yang jauh lebih rendah, seperti Meksiko (11.385 USD), Turki (10.674 USD), dan Kolombia (6.674 USD). Negara dengan nilai terendah dalam grafik ini adalah Estonia, dengan GDP per kapita sekitar 1.011 USD.

Hubungan antara GDP per kapita dan emisi karbon umumnya bersifat positif, terutama pada tahap awal pertumbuhan ekonomi suatu negara. Negara-negara dengan GDP per kapita rendah hingga menengah, seperti Meksiko, Turki, dan Kolombia, cenderung mengalami peningkatan emisi karbon seiring dengan industrialisasi dan pertumbuhan sektor manufaktur yang masih bergantung pada energi fosil. Namun, dalam jangka panjang, pola hubungan ini dapat mengikuti konsep Environmental Kuznets Curve (EKC), di mana emisi karbon awalnya meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi, tetapi setelah mencapai tingkat pendapatan tertentu, negara mulai beralih ke teknologi yang lebih ramah lingkungan, meningkatkan efisiensi energi, dan mengurangi emisi karbon. Negara-negara maju seperti Swedia, Swiss, dan Denmark dengan GDP per kapita tinggi telah menunjukkan tren penurunan emisi karbon karena adopsi energi terbarukan serta kebijakan lingkungan yang ketat. Di sisi lain, negara-negara dengan GDP tinggi seperti United States dan Kanada masih memiliki tingkat emisi karbon yang tinggi akibat ketergantungan pada kendaraan pribadi, industri berbasis bahan bakar fosil, serta kebutuhan energi yang besar.

Hasil studi Ochi & Saidi (2024) menunjukkan bahwa GDP Per kapita berpengaruh positif terhadap emisi karbon dioksida. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Nadeak & Nasrudin (2023) bahwa baik dalam jangka panjang maupun pendek, GDP per kapita berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂. Namun temuan lain dari Methmini et al (2025) diketahui bahwa GDP Per

kapita berpengaruh negatif terhadap emisi karbon dioksida. Hal ini mendukung hipotesis Kurva Kuznets Lingkungan, yang menyatakan tingkat pendapatan yang lebih tinggi menyebabkan berkurangnya degradasi lingkungan. Environmental Kuznets Curve (EKC) menjelaskan hubungan antara GDP per kapita dan emisi karbon dengan pola berbentuk kurva U terbalik. Pada tahap awal pertumbuhan ekonomi, peningkatan GDP per kapita sering kali disertai dengan peningkatan emisi karbon. Hal ini terjadi karena industrialisasi, peningkatan konsumsi energi fosil, dan penggunaan teknologi yang belum efisien.

Berdasarkan penjelasan pada latar belakang, penelitian ini akan berfokus pada bagaimana intensitas energi dapat menjadi proksi teknologi dalam kerangka STIRPAT dalam pengaruhnya memengaruhi peningkatan emisi CO₂. Pemilihan objek penelitian berupa negara-negara OECD juga merupakan alasan dikarenakan sebagian besar studi sebelumnya juga berfokus pada negara atau kelompok negara-negara berkembang seperti ASEAN tanpa memperhatikan bahwa negara-negara maju sangat berperan dalam memengaruhi peningkatan emisi total dunia. Adapun alasan lain mengapa OECD dipilih sebagai objek penelitian adalah karena pertama, OECD merupakan kelompok negara yang sejak lama menjadi pelopor dalam kebijakan lingkungan dan transisi energi, termasuk penerapan carbon tax, mekanisme perdagangan emisi, serta target net-zero yang ambisius. Kedua, OECD memiliki kontribusi yang cukup berpengaruh terhadap konsumsi energi global sekaligus menjadi pasar utama inovasi teknologi energi bersih, sehingga perannya penting dalam mendorong pengurangan emisi di tingkat internasional. Ketiga, meskipun secara absolut BRICS menyumbang emisi karbon lebih besar daripada OECD, sebesar 48% (data IEA, 2023) sedangkan OECD 31%, namun beberapa fenomena lingkungan yang dijelaskan di awal latarbelakang menjadi alasan mengapa OECD menarik untuk dibahas ketika disisi lain justru lebih unggul dalam hal konsumsi energi terbarukan dan penerapan kebijakan transisi energi. Hal ini menjadikan OECD relevan untuk dikaji karena dapat memberikan gambaran bagaimana faktor ekonomi, energi, dan teknologi berperan dalam menekan emisi karbon di negara maju.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latarbelakang yang telah dijelaskan, maka dapat disimpulkan beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh emisi karbon CO₂ tahun sebelumnya terhadap emisi karbon CO₂ di negara-negara anggota OECD?
2. Bagaimana pengaruh jumlah penduduk terhadap emisi karbon CO₂ di negara-negara anggota OECD?
3. Bagaimana pengaruh GDP per kapita terhadap emisi karbon CO₂ di negara-negara anggota OECD?
4. Bagaimana pengaruh intensitas energi terhadap emisi karbon CO₂ di negara-negara anggota OECD?
5. Bagaimana pengaruh emisi karbon tahun sebelumnya, jumlah penduduk, GDP per kapita dan intensitas energi, berpengaruh terhadap peningkatan Emisi Karbon CO₂ di negara-negara anggota OECD secara simultan?

1.3. Tujuan Penelitian

Penulis menyimpulkan tujuan penelitian sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh emisi karbon CO₂ tahun sebelumnya terhadap emisi karbon CO₂ di negara-negara anggota OECD.
2. Mengetahui pengaruh jumlah penduduk terhadap emisi karbon CO₂ di negara-negara anggota OECD.
3. Mengetahui pengaruh GDP per kapita terhadap emisi karbon CO₂ di negara-negara anggota OECD.
4. Mengetahui pengaruh intensitas energi terhadap emisi karbon CO₂ di negara-negara anggota OECD.
5. Mengetahui apakah emisi karbon tahun sebelumnya, jumlah penduduk GDP per kapita dan intensitas energi berpengaruh terhadap Emisi Karbon CO₂ di negara-negara anggota OECD secara simultan.

1.4. Manfaat Penelitian

Bagi Pemerintah

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan saran kepada pemerintah tentang menentukan kebijakan yang tepat dalam mengurangi emisi CO₂ akibat kegiatan ekonomi maupun dari kegiatan masyarakat.

Bagi Akademisi dan Peneliti

Diharapkan penelitian ini dapat memperkaya bahan pustaka mengenai variabel-variabel yang berpengaruh terhadap emisi CO₂, serta dapat memberikan informasi dan bahan referensi untuk penelitian selanjutnya.

Bagi Masyarakat

Diharapkan dapat meningkatkan pengetahuan masyarakat mengenai apa saja yang memengaruhi peningkatan emisi karbon

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Teoritis

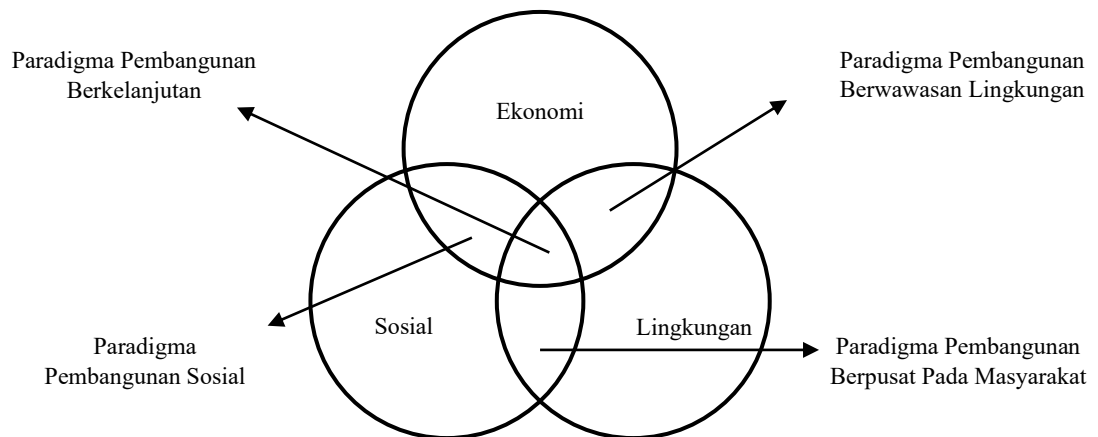
2.1.1. Pembangunan Berkelanjutan

Pembangunan Berkelanjutan atau Sustainable Development adalah pembangunan yang memenuhi kebutuhan masa kini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri. Konsep Pembangunan Berkelanjutan dimulai pada tahun 1972, yaitu pada Konferensi Persatuan Bangsa-bangsa (PBB) tentang Lingkungan Manusia yang diadakan di Stockholm, Swedia. Ini merupakan pertemuan internasional besar pertama yang membahas keberlanjutan dalam skala global. Konferensi tersebut menciptakan momentum yang cukup besar dan serangkaian rekomendasi yang mengarah pada pembentukan Program Lingkungan PBB atau United Nations Environment Programme (UNEP) serta penciptaan berbagai perlindungan instansi lingkungan di tingkat nasional (Indrianti *et al*, 2022). Konsep pembangunan berkelanjutan telah lama menjadi perhatian para ahli. Namun, istilah keberlanjutan baru telah digunakan dalam beberapa dekade terakhir, meskipun perhatian terhadap keberlanjutan sudah dimulai sejak Malthus pada tahun 1798 yang mengkhawatirkan ketersediaan lahan di Inggris akibat ledakan penduduk yang pesat (Rahadian, 2016).

Tujuan Pembangunan Berkelanjutan dikenal dengan singkatan SDG (Sustainable Development Goals) memuat pola pembangunan yang mencakup 3 pilar utama pembangunan sosial, ekonomi dan lingkungan serta pilar hukum dan tata-kelola. Pilar pembangunan sosial memiliki 5 tujuan: mengakhiri kemiskinan; menghilangkan kelaparan, membangun kehidupan yang sehat dan sejahtera; menjamin kualitas pendidikan yang inklusif; mencapai kesetaraan gender. Pilar pembangunan ekonomi dengan 5 tujuan: menjamin ketersediaan air dan fasilitas

sanitasi; menjamin akses energi; meningkatkan pertumbuhan ekonomi yang inklusif; membangun infrastruktur yang tangguh; mengurangi kesenjangan intra dan antar-negara. Pilar pembangunan lingkungan dengan 6 tujuan: penyediaan air bersih dan sanitasi layak; pengembangan kota dan permukiman berkelanjutan, konsumsi dan produksi secara berkelanjutan; penanganan dampak perubahan iklim, ekosistem lautan dan daratan; Pilar pembangunan hukum dan tata kelola untuk menyalurkan arus ekonomi-sosial dan lingkungan dalam kerangka umum menegakkan “Good Governance.” Keempat pilar pembangunan diperinci lebih detail dalam 169 sasaran dengan 320 indikator yang dirangkum dalam Metadata Indikator SDG Agenda Global 2015-2030 (Salim, 2010).

Lalu menurut (Hikmat, 2000), ada tiga dimensi pembangunan berkelanjutan: ekonomi (economic sustainability), sosial (social sustainability), dan ekologi (environmental sustainability). Pembangunan sosial (social development), pembangunan berwawasan lingkungan (environmental development), dan pembangunan yang berpusatkan pada rakyat (people-centered development) adalah tiga paradigma pembangunan yang dihasilkan dari kombinasi bagian yang saling berhubungan antara domain tersebut. Paradigma pembangunan berkelanjutan merupakan gabungan dari ketiga paradigma ini. Jika pembangunan memenuhi syarat ekonomis, memberikan manfaat sosial, dan tetap ramah lingkungan, pembangunan tersebut dapat dianggap berkelanjutan (Mukhlis, 2009).



Sumber : Winarto et al (2019)

Gambar 8. Paradigma Pembangunan

Barile dan lainnya (2018) menjelaskan ketiga domain atau dimensi dalam pembangunan berkelanjutan adalah sebagai berikut.

1. Keberlanjutan ekonomi (*economic sustainability*), sebagai kemampuan untuk menggunakan sumber daya yang tersedia secara efisien untuk memastikan keuntungan dari waktu ke waktu.
2. Keberlanjutan sosial (*social sustainability*), sebagai kemampuan untuk memastikan kondisi stabilitas, demokrasi, partisipasi, dan keadilan, serta kemungkinan untuk menjamin bahwa kondisi kesejahteraan manusia (keselamatan, kesehatan, pendidikan) didistribusikan secara merata di antara kelas dan gender.
3. Keberlanjutan lingkungan (*environmental sustainability*), sebagai kemampuan untuk menjaga kualitas dan reproduktivitas sumber daya alam.

Jika bicara keberlanjutan lingkungan, salah satu tantangan utama yang dihadapi saat ini adalah meningkatnya emisi karbon dioksida (CO₂) sebagai akibat dari dominasi penggunaan energi berbasis bahan bakar fosil. Sumber energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam telah menjadi tulang punggung pertumbuhan ekonomi global selama berabad-abad. Namun, ketergantungan yang terus-menerus terhadap sumber energi ini telah menyebabkan degradasi lingkungan, perubahan iklim, serta

ancaman terhadap keberlangsungan kehidupan makhluk hidup. Oleh karena itu, dalam kerangka pembangunan berkelanjutan, transisi menuju energi terbarukan menjadi bagian penting dalam mencapai dimensi keberlanjutan lingkungan. Energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, air, dan bioenergi merupakan alternatif yang bersih dan ramah lingkungan karena memiliki tingkat emisi karbon yang jauh lebih rendah dibandingkan energi fosil. Selain itu, sumber energi terbarukan juga bersifat dapat diperbarui dan tidak habis oleh waktu, menjadikannya sesuai dengan prinsip *intergenerational equity* yakni memenuhi kebutuhan energi generasi saat ini tanpa mengorbankan akses energi generasi mendatang.

Lebih jauh, transisi energi ini tidak hanya mendukung keberlanjutan dari sisi lingkungan, tetapi juga berdampak pada keberlanjutan ekonomi dan sosial. Secara ekonomi, inovasi dalam sektor energi terbarukan membuka peluang investasi baru, penciptaan lapangan kerja hijau, dan pertumbuhan industri teknologi bersih. Sementara itu, secara sosial, akses terhadap energi bersih dan terjangkau dapat meningkatkan kualitas hidup, terutama bagi masyarakat di daerah terpencil yang selama ini belum terjangkau oleh infrastruktur energi konvensional.

2.1.2. Emisi Karbon Dioksida (CO₂)

Karbon dioksida (CO₂) adalah gas rumah kaca yang paling banyak dihasilkan oleh aktivitas manusia, terutama dari pembakaran bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Gas ini berasal dari sektor industri, transportasi, serta pembangkit listrik, dan meskipun efek pemanasannya tidak sekuat gas lain, jumlahnya yang melimpah di atmosfer membuatnya menjadi penyumbang utama perubahan iklim. Emisi karbon adalah jumlah emisi gas rumah kaca yang dilepaskan oleh pribadi atau kelompok dalam melakukan kegiatannya per periode tertentu yang diukur dengan satuan ton-setara CO₂ (tCO₂e) atau kg-setara CO₂ (kgCO₂e) (Dian, 2016).

2.1.3. Eksternalitas

Eksternalitas terjadi ketika suatu aktivitas yang dilakukan oleh satu pihak menimbulkan dampak, baik positif maupun negatif, terhadap pihak lain, namun dampak tersebut tidak sepenuhnya diperhitungkan dalam keputusan pihak yang melakukan aktivitas tersebut, karena ia tidak menanggung biaya maupun menerima manfaat dari dampak yang ditimbulkan. (Gruber, 2010).

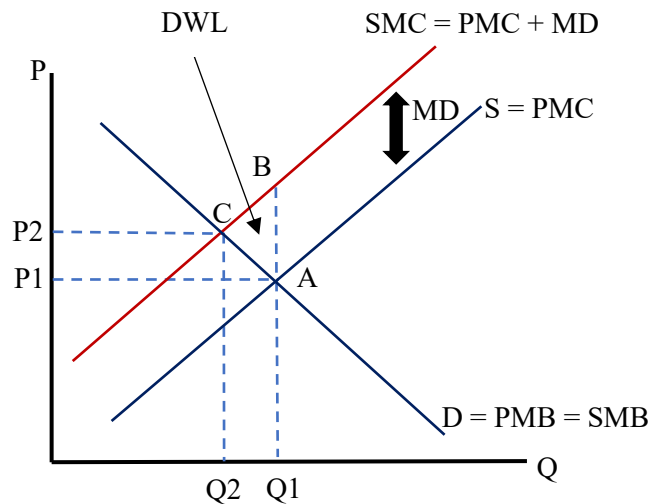
Eksternalitas adalah biaya atau manfaat dari transaksi pasar yang tidak tercermin dalam harga. Ketika eksternalitas terjadi, pihak ketiga (selain pembeli atau penjual suatu barang) terkena dampak dari produksi atau konsumsi barang tersebut. Manfaat atau biaya yang dialami oleh pihak ketiga (baik rumah tangga maupun bisnis) tidak dipertimbangkan oleh pembeli atau penjual barang yang produksinya atau penggunaannya mengakibatkan eksternalitas (David, 2010).

Menurut Rinawati (dalam Virdausya et al., 2020), eksternalitas adalah biaya atau manfaat yang timbul dari transaksi pasar yang tidak tercermin dalam harga pasar. Tindakan konsumsi atau produksi oleh suatu pihak dapat mempengaruhi pihak lain tanpa adanya kompensasi yang dibayarkan oleh pihak yang menyebabkan dampak atau diterima oleh pihak yang merasakan dampaknya. Dengan adanya eksternalitas, pihak ketiga seperti mereka yang terkena dampak dari pencemaran air atau udara menanggung beban yang tidak mereka pilih.

Nasrudin (2013) berpendapat bahwa eksternalitas dapat diakibatkan oleh produksi atau konsumsi. Konsumsi (produksi) eksternalitas terjadi ketika pihak ketiga terdampak oleh pihak yang melakukan konsumsi atau produksi terhadap suatu barang atau jasa, baik secara positif maupun negatif, meskipun pihak ketiga tersebut bukan merupakan pihak yang terlibat dalam transaksi konsumsi atau produksi. Dalam setiap kasus, produksi atau konsumsi oleh satu orang memberi manfaat/biaya bagi orang lain yang tidak membayar untuk untuk mendapatkan barang atau layanan, dalam kondisi yang tidak bisa dihindarkan. Mangkoesobroto (1994) menyatakan bahwa ada dua syarat untuk terjadinya eksternalitas, yaitu Adanya pengaruh dari suatu tindakan dan tidak adanya kompensasi yang dibayarkan atau diterima.

a. Eksternalitas Produksi Negatif

Eksternalitas produksi negatif ketika produksi perusahaan mengurangi kesejahteraan orang lain yang tidak mendapatkan kompensasi dari perusahaan (Gruber, 2010). Sebagai contoh dapat dilihat pada kurva berikut ini.



Gambar 9. Eksternalitas Produksi Negatif

Eksternalitas produksi negatif terjadi ketika Private Marginal Cost (PMC) yang dipertimbangkan produsen lebih kecil daripada Social Marginal Cost (SMC) yang ditanggung masyarakat. Perbedaan ini dapat dijelaskan lebih mendalam melalui teori STIRPAT, yang menyatakan bahwa dampak lingkungan merupakan fungsi dari Population (P), Affluence (A), dan Technology (T). Peningkatan populasi memperbesar jumlah masyarakat yang terdampak pencemaran, pertumbuhan kemakmuran meningkatkan skala produksi dan konsumsi, sementara teknologi produksi yang tidak ramah lingkungan memperbesar jumlah limbah per unit output. Interaksi ketiga faktor tersebut meningkatkan marginal damage (MD) dari aktivitas produksi, sehingga SMC meningkat lebih cepat dibanding PMC, karena biaya lingkungan tidak diperhitungkan oleh produsen. Di sisi lain, meskipun Social Marginal Benefit (SMB) dari produksi tetap ada dalam bentuk manfaat ekonomi, degradasi lingkungan yang dihasilkan oleh proses produksi menyebabkan manfaat sosial bersih lebih rendah dibanding manfaat privat. Akibatnya, produsen menentukan tingkat produksi pada keseimbangan pasar privat ketika PMC sama

dengan PMB, yaitu pada kuantitas yang lebih tinggi daripada tingkat produksi optimal sosial, di mana SMC seharusnya sama dengan SMB. Kondisi ini menghasilkan overproduksi dan deadweight loss, yang menunjukkan bahwa keseimbangan pasar gagal memaksimalkan kesejahteraan sosial.

Secara teoritis, ketika aktivitas produksi menimbulkan eksternalitas negatif dan Private Marginal Cost (PMC) lebih rendah daripada Social Marginal Cost (SMC), produsen akan memproduksi pada tingkat yang melebihi tingkat optimal sosial. Dalam kerangka STIRPAT, kondisi ini berarti bahwa Population, Affluence, dan Technology mendorong peningkatan skala aktivitas ekonomi tanpa diimbangi oleh internalisasi biaya lingkungan. Akibatnya, emisi CO₂ atau degradasi lingkungan meningkat lebih cepat daripada yang optimal secara sosial, karena setiap tambahan unit output menghasilkan emisi yang tidak sepenuhnya dihargai dalam keputusan produksi. Pertumbuhan penduduk memperbesar total emisi, peningkatan kemakmuran seperti GDP per kapita meningkatkan permintaan energi dan output industri, sementara teknologi yang bersifat intensif karbon meningkatkan emisi per unit produksi. Kombinasi ini menyebabkan akumulasi emisi CO₂ dan kerusakan lingkungan yang berkelanjutan, di mana tingkat pencemaran berada di atas tingkat yang memaksimalkan kesejahteraan sosial. Secara jangka panjang, kegagalan pasar ini memperbesar kesenjangan antara pertumbuhan ekonomi dan kualitas lingkungan, sehingga tanpa intervensi kebijakan, degradasi lingkungan akan terus meningkat meskipun manfaat ekonomi marjinal dari produksi semakin menurun.

Keterangan :

S = *Supply*

D = *Demand*

P = *Price*

Q = *Quantity*

PMC = *Private Marginal Cost*, biaya tambahan yang ditanggung produsen untuk memproduksi satu unit

SMC = *Social Marginal Cost*, biaya tambahan yang ditanggung oleh masyarakat untuk satu unit barang atau jasa yang diproduksi

$PMB = Private Marginal Benefit$, manfaat tambahan yang diperoleh konsumen dari mengonsumsi satu unit tambahan barang atau jasa

$SMB = Social Marginal Benefit$, manfaat tambahan yang diperoleh masyarakat dari mengonsumsi satu unit tambahan barang atau jasa

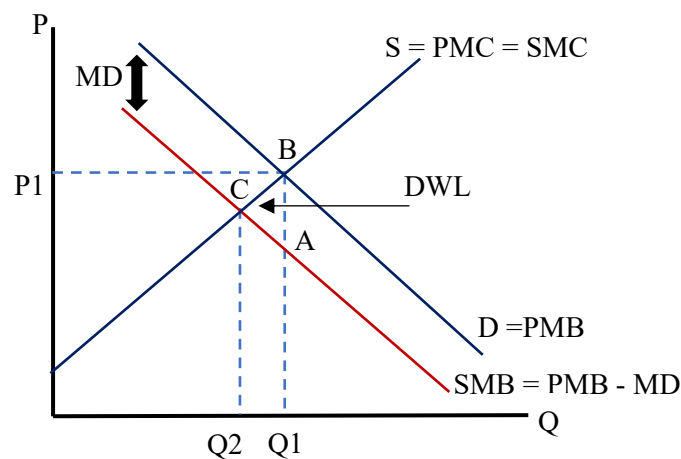
$MD = Marginal Damage$, seberapa besar biaya tambahan yang dikenakan masyarakat dari eksternalitas negatif

$MB = Marginal Benefit$, seberapa besar manfaat tambahan dari konsumsi atau produksi suatu barang

$DWL = Dead Weight Loss$, hilangnya efisiensi ekonomi Ketika alokasi sumber daya tidak optimal

b. Eksternalitas Konsumsi Negatif

Eksternalitas konsumsi negatif adalah suatu keadaan ketika konsumsi individu mengurangi kesejahteraan orang lain yang tidak mendapatkan kompensasi dari individu tersebut (Gruber, 2010). Sebagai contoh dapat dilihat pada kurva berikut ini.



Gambar 10. Eksternalitas Konsumsi Negatif

Pada Gambar 3 menunjukkan kurva penawaran dan permintaan di pasar rokok dimana kurva penawaran dan permintaan tersebut merepresentasikan PMC dan PMB . Dalam eksternalitas konsumsi negatif, kurva penawaran dan permintaan merepresentasikan Private Marginal Cost (PMC) dan Private Marginal Benefit

(PMB), sehingga keseimbangan pasar privat tercapai pada titik di mana PMC sama dengan PMB. Karena tidak terdapat eksternalitas dalam proses produksi, Social Marginal Cost (SMC) sama dengan PMC. Namun, konsumsi suatu barang dapat menimbulkan dampak negatif bagi pihak lain yang tidak terlibat dalam transaksi pasar, sehingga Social Marginal Benefit (SMB) lebih rendah daripada PMB sebesar marginal damage (MD). Dalam kerangka teori STIRPAT, besarnya MD tersebut dipengaruhi oleh interaksi Population, Affluence, dan Technology, di mana pertumbuhan populasi memperbesar jumlah pihak yang terdampak konsumsi, peningkatan kemakmuran meningkatkan intensitas konsumsi, dan teknologi konsumsi tertentu memperbesar dampak lingkungan atau sosial per unit konsumsi. Karena konsumen hanya mempertimbangkan manfaat privat dan mengabaikan dampak STIRPAT terhadap lingkungan dan masyarakat, tingkat konsumsi yang dipilih pasar privat lebih tinggi daripada tingkat konsumsi yang optimal secara sosial, yaitu ketika $SMB = SMC$. Selisih antara tingkat konsumsi privat dan sosial ini menciptakan overconsumption dan deadweight loss, yang menunjukkan kegagalan pasar dalam mengalokasikan sumber daya secara efisien. Akibatnya, konsumsi berlebihan ini menyebabkan emisi CO₂ yang melebihi tingkat optimal, akumulasi limbah, serta tekanan berkelanjutan terhadap ekosistem, sehingga degradasi lingkungan terus meningkat meskipun manfaat sosial marjinal dari konsumsi tersebut semakin menurun. Dalam jangka panjang, tanpa internalisasi eksternalitas, pola konsumsi ini memperlebar kesenjangan antara kesejahteraan ekonomi dan keberlanjutan lingkungan.

2.1.4. Model IPAT dan STIRPAT

IPAT dikembangkan oleh Dietz & Rosa (1994) Model ini dirancang untuk mengkuantifikasi hubungan antara aktivitas manusia dan dampak lingkungan dan selanjutnya diubah menjadi bentuk stokastik melalui STIRPAT Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology (York et al., 2003). Persamaan IPAT dinyatakan sebagai:

$$I = P \times A \times T \quad (1)$$

Di mana:

- I (Impact): Dampak lingkungan, seperti polusi atau emisi gas rumah kaca.
- P (Population): Jumlah penduduk manusia.
- A (Affluence): Tingkat kesejahteraan atau konsumsi per kapita, sering diukur dengan GDP per kapita.
- T (Technology): Faktor teknologi, yang mencerminkan efisiensi atau intensitas dampak lingkungan per unit konsumsi.

Model IPAT dirancang untuk menunjukkan bahwa dampak lingkungan adalah hasil dari interaksi antara penduduk, kesejahteraan, dan teknologi. Ehrlich dan Holdren menggunakan model ini untuk mendukung argumen mereka bahwa pertumbuhan penduduk (P) adalah faktor kunci, tetapi mereka juga mengakui peran kesejahteraan (A) dan teknologi (T).

Model ini menganalisis dampak aktivitas manusia terhadap lingkungan dan menyediakan dasar teoritis untuk pemahaman yang lebih mendalam tentang mekanisme emisi karbon. Sementara kerangka teoritis ini memberikan wawasan tentang tren pertumbuhan emisi karbon, ia juga memberikan dasar untuk memahami dampak perubahan tingkat urbanisasi terhadap emisi karbon. Namun, model ini sederhana dan mengasumsikan efek proporsional dari setiap faktor yang memengaruhi. Untuk mengatasi keterbatasan ini, Dietz dan Rosa (dalam Ma & Ogata, 2024) mengusulkan model STIRPAT, yang memiliki ekspresi dasar berikut

$$I = a \times bP \times cA \times dT \times e \quad (2)$$

Di mana a adalah suku konstan model; b , c , dan d adalah koefisien masing-masing variabel independen; dan e adalah standar error. STIRPAT adalah model nonlinier multivariat. Untuk menganalisis pengaruh berbagai faktor terhadap I , Persamaan (2) dapat diubah menjadi bentuk linier melalui pemrosesan logaritmik:

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + \ln e \quad (3)$$

Pada persamaan 3 di atas menjelaskan variabel dependen dan independen, yang menunjukkan persentase perubahan variabel dependen yang diakibatkan oleh

perubahan 1% pada variabel independen, sementara variabel independen lainnya tetap konstan.

Selanjutnya kita dapat membentuk ulang model STIRPAT dengan variable-variabel dalam penelitian sebagai berikut:

$$\ln CO_2 = a + b_1 \ln PT + b_2 \ln GDPP + b_3 \ln EI + uit \quad (4)$$

Dimana model ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

Kenaikan jumlah penduduk (P) secara langsung meningkatkan permintaan energi, lahan, dan sumber daya lainnya, sehingga memperbesar emisi CO₂ dan polusi lainnya. Beban tambahan inilah yang menjadi eksternalitas negatif; masyarakat menanggung dampak kesehatan dan lingkungan tanpa kompensasi dari pertumbuhan penduduk tersebut (Helbling, 2020). Penelitian dari Weber & Sciubba (2019) mendukung hubungan ini, mereka menemukan “efek besar” (considerable effect) dari pertumbuhan populasi terhadap kenaikan emisi CO₂.

GDP per kapita (GDPP) umumnya mendorong konsumsi barang dan energi lebih besar, yang berujung pada emisi CO₂ lebih tinggi - sekali lagi menciptakan eksternalitas negatif. Dalam banyak studi STIRPAT, elastisitas A relatif besar dan positif terhadap I (Lohwasser & Schaffer, 2023). Dengan kata lain, negara atau daerah yang lebih kaya cenderung menghasilkan emisi lebih besar per orang. Hal ini tercermin dalam litera-tur: sebagian besar studi STIRPAT menegaskan korelasi positif antara tingkat kemakmuran dan tekanan lingkungan (emisi, polusi). Namun, pada titik kemakmuran sangat tinggi kadang muncul efek Environmental Kuznets Curve di mana negara-negara maju mulai mengadopsi teknologi bersih sehingga laju kenaikan emisi melambat. Dalam hal ini, investasi pada teknologi hijau bisa dikatakan menginternalisasi eksternalitas negatif dan justru menciptakan eksternalitas positif bagi masyarakat (contohnya pengurangan emisi berkat pengendalian polusi dan efisiensi energi).

T mencakup berbagai aspek teknologi seperti teknologi ramah lingkungan yang mendukung transisi energi terbarukan dan efisiensi energi serta intensitas karbon. Menurut Dietz dan Rosa (1994) menggarisbawahi pentingnya memformulasikan T,

variabel teknologi, dalam identitas IPAT dan model STIRPAT, karena T bukanlah faktor tunggal melainkan terdiri dari banyak faktor terpisah yang memengaruhi dampak lingkungan. York et al (2003) berpendapat juga bahwa T dalam model STIRPAT mencakup banyak faktor apa pun yang memengaruhi dampak per unit produksi.

Dalam Kaya Identity, ia berusaha menjelaskan T menjadi intensitas energi dan intensitas karbon (Kaya, 1990). Intensitas energi, yang juga diproksikan sebagai teknologi dalam model STIRPAT didefinisikan sebagai konsumsi energi primer per satuan GDP, juga sering digunakan sebagai proxy untuk teknologi. Menurut Quan et al (2024) intensitas energi berkontribusi terhadap degradasi lingkungan. Secara konseptual, intensitas energi rendah menunjukkan teknologi yang lebih efisien. Intensitas energi adalah indikator efisiensi energi suatu negara. Penurunan nilai intensitas energi diartikan sebagai peningkatan efisiensi teknologi: semakin kecil intensitasnya, semakin sedikit energi yang dibutuhkan untuk memproduksi satu unit output, yang berarti teknologi energi semakin maju. Studi Dogan & Shah (2022) mendefinisikan intensitas energi sebagai “indikator teknologi” yang menunjukkan seberapa efisien energi digunakan. Penelitian lain dari Yilmaz & Sensoy (2022) memproksikan teknologi sebagai share of industry in GDP beserta intensitas energi yang diukur sebagai penggunaan energi per unit GDP.

2.2. Penelitian Terdahulu

Tabel 2. Penelitian Terdahulu

No	Nama dan Tahun	Judul	Variabel	Metode	Hasil/Kesimpulan
1	Puntoon et al (2022)	The impacts of economic growth, industrial production, and energy consumption on CO ₂ emissions: A case study of leading CO ₂ emitting countries	Carbon dioxide, Energy consumption, Gross Domestic Product, Industrial Production Index	Panel Data Regression	Hasil menunjukkan bahwa konsumsi energi terbarukan memberikan bukti positif yang menentukan terhadap emisi CO ₂ , sementara pertumbuhan ekonomi dan produksi industri menunjukkan bukti positif yang lemah.
2	Jiang et al (2024)	Role of natural resources, renewable energy sources, eco-innovation and carbon taxes in carbon neutrality: Evidence from G7 economies	Carbon dioxide emission, PM2.5 Air pollution, Eco-innovation, Natural resource dependence, Renewable energy, Biofuels, Carbon tax, Environmental policy, Financial Development	Cross-sectional autoregressive distributed lag	Hasil penelitian menunjukkan bahwa biofuel dan sumber energi terbarukan (RE), carbon taxes, environmental policy, dan eco-innovation dapat mengurangi emisi gas rumah kaca (CO ₂ emissions). Sementara itu, financial development dan natural resource dependence memberikan dampak positif terhadap carbon neutrality.
4	Wei & Lahiri (2022)	Urbanization, energy-use intensity and emissions: A sectoral approach	CO ₂ emission, per capita income level, urbanization, and intensity of energy use	Panel Data Regression	<i>Intensitas penggunaan energi</i> berpengaruh positif, urbanisasi dan pendapatan per kapita memainkan peran penting dalam proses mempengaruhi emisi.
5	Marra et al (2024)	The ‘complex’ transition: Energy intensity and CO ₂ emissions amidst technological and structural shifts. Evidence from OECD countries	CO ₂ emissions, environmental tax revenues, R&D expenditures, patents on environment technologies, energy intensity, structural change in the economy, manufacturing added value added, gross domestic product per capita	Panel Vector Autoregressive Model	Intensitas energi menyebabkan emisi yang lebih rendah dan memacu perubahan teknologi/struktural.

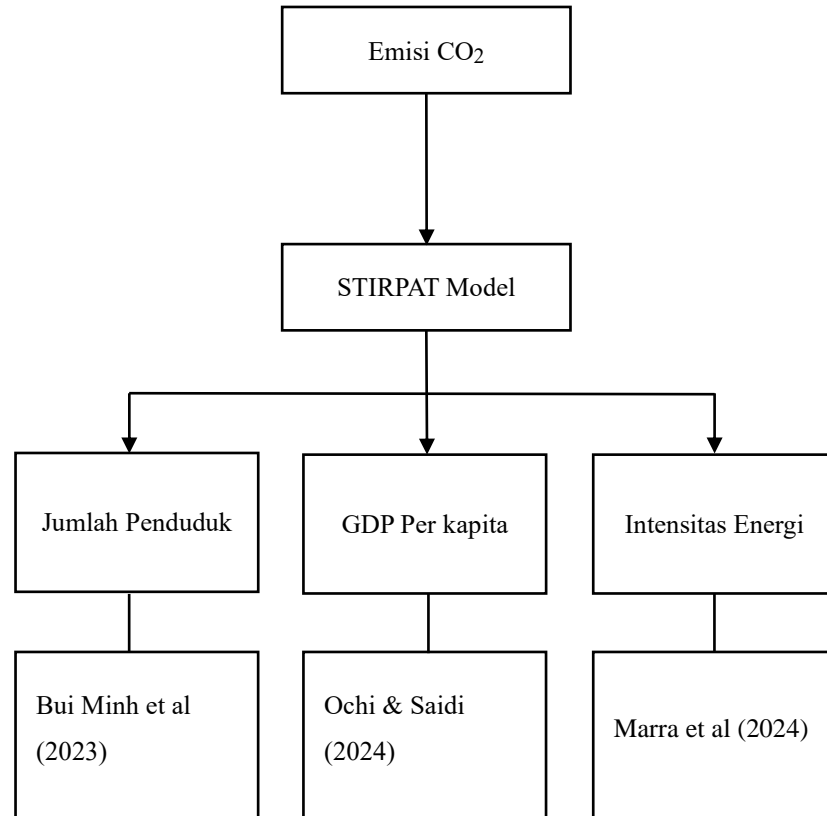
6	Ochi & Saidi (2024)	Impact of governance quality, population and economic growth on greenhouse gas emissions: An analysis based on a panel VAR model	population change, economic growth, governance quality, and climate change	Panel Vector Autoregressive Model	pertumbuhan populasi dan pertumbuhan ekonomi memiliki pengaruh positif dan signifikan terhadap perubahan iklim dan dapat menjelaskan kenaikan suhu Bumi secara bertahap. Hubungan negatif dan signifikan antara kualitas tata kelola dan emisi GRK. Kausalitas dua arah antara emisi GRK, populasi, dan pertumbuhan ekonomi.
7	Bui Minh et al (2023)	Relationship between carbon emissions, economic growth, renewable energy consumption, foreign direct investment, and urban population in Vietnam	CO ₂ emissions, economic growth, foreign direct investment, renewable energy usage, and urban population	Autoregressive Distributed Lag Model	Hasil penelitian menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi meningkat seiring dengan emisi CO ₂ hingga mencapai tingkat ambang tertentu dan kemudian emisi CO ₂ menurun, sehingga mendukung teori kurva Kuznets lingkungan untuk Vietnam. Adapun hubungan kausalitas antar variabel menggunakan model kausalitas Granger menentukan bahwa FDI, populasi perkotaan, dan konsumsi energi terbarukan memainkan peran penting dan berdampak besar pada emisi karbon di Vietnam.
8	Liang et al (2023)	Population density regulation may mitigate the imbalance between anthropogenic carbon emissions and vegetation carbon sequestration	Carbon Emission, Population Density	Panel Data Regression	Pengelompokan populasi dapat mengurangi emisi karbon di kota-kota dengan emisi karbon yang lebih tinggi.
9	Hong et al (2022)	Relationships between carbon emissions and urban population size and density, based on geo-urban scaling analysis: A multi-carbon source empirical study	Carbon emissions, urban population size and density	Ordinary Least Squares	Peningkatan kepadatan perkotaan dapat mendorong pengurangan karbon ketika populasi perkotaan lebih kecil dari satu juta. Sebaliknya, meningkatnya kepadatan perkotaan akan meningkatkan emisi karbon apabila jumlah penduduk perkotaan melebihi satu juta jiwa.

10	Xuan (2025)	Nexus of FDI, GDP, renewable energy, trade openness, and environmental pollution in Japan: New evidence from ARDL method	Foreign Direct Investment, Gross Domestic Product, Renewable Energy , Trade Openness, and CO ₂	Autoregressive Distributed Lag Model	FDI dan TO berkontribusi signifikan terhadap pertumbuhan GDP, dampaknya terhadap emisi CO ₂ dengan liberalisasi perdagangan berpotensi menyebabkan emisi yang lebih tinggi dalam jangka pendek. Sebaliknya, penerapan RE menunjukkan hubungan negatif yang kuat dengan emisi CO ₂ , yang menunjukkan perannya dalam mendekarbonisasi ekonomi.
11	Methmini et al (2025)	Economic and trade determinants of carbon emissions in the American region	Energy consumption, gross domestic product (GDP), and trade openness, carbon emissions	Multiple Linear Regression Model	Konsumsi energi, GDP dan keterbukaan perdagangan memiliki dampak yang positif dan bervariasi.
12	Xiu (2025)	Analyzing the impact of supply chain and digitalization in the Chinese economy: What is the role of energy consumption, government expenditure, and industrialization in environmental pollution?	Energy consumption, supply chain, digitalization, government final consumption expenditure, industrialization, economic development, emissions	Kernel Regularized Least Squares	Konsumsi energi, rantai pasokan, dan digitalisasi berdampak negatif terhadap emisi polusi udara, yang menekankan perlunya praktik berkelanjutan dalam ekonomi Tiongkok. Namun, pengeluaran pemerintah, industrialisasi, dan pembangunan ekonomi memiliki pengaruh positif,
13	Islami et al (2022)	The Effect of Population, GDP, Non-Renewable Energy Consumption and Renewable Energy Consumption on Carbon Dioxide Emissions in G-20 Member Countries	Population, gross domestic product, consumption of non-renewable energy, renewable energy , carbon dioxide	Panel Data Regression	Jumlah Penduduk berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi karbondioksida, Produk Domestik Bruto (GDP) berpengaruh positif dan tidak signifikan terhadap emisi karbondioksida, Konsumsi Energi Tak Terbarukan berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi karbondioksida , Konsumsi Energi Terbarukan berpengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi karbondioksida

14	Danish et al (2025)	Achieving net-zero carbon emission targets in OECD countries: The role of the energy transition, institutional quality, and green technological innovation	Energy transition, green innovation, carbon dioxide	The Augmented Anderson-Hsiao	Transisi energi secara langsung mengendalikan emisi CO. Kualitas kelembagaan juga memainkan peran langsung dalam mitigasi emisi. Selain itu, inovasi teknologi hijau merupakan faktor pendorong lain yang meminimalkan tingkat polusi melalui mitigasi emisi CO ₂ .
15	Assaf (2023)	The Influence of Environmental Tax and Technology on different Air Pollution Emission in OECD Countries	Nitrous oxides, Carbon dioxide, Particulate Matter, Overall OECD Environmental tax, Overall OECD Patents of air pollution technology, Overall OECD Air pollution abatement technology, Overall OECD Gross Domestic Product, Overall OECD Population Size, Carbon monoxide	Panel Autoregressive Distributed Lag	Karbon dioksida ditemukan memiliki hubungan jangka panjang dengan variabel-variabel independen ini, berbeda dengan dua variabel dependen lainnya. Namun, dalam semua kasus, baik pajak lingkungan maupun teknologi secara signifikan mempengaruhi emisi polutan udara. Peningkatan dalam teknologi, tingkat pertumbuhan tahunan, dan pajak menunjukkan hubungan positif.
16	Tao et al (2025)	Deciphering the impact of electric vehicles on carbon emissions: Some insights from an extended STIRPAT framework	Carbon emissions, electric vehicle adoption, economic growth, population density, green technological advancements, and renewable energy utilization	Method of Moments Quantile Regression	Adopsi kendaraan listrik secara signifikan meningkatkan emisi karbon di semua kuantil. Sebaliknya, inovasi hijau, proporsi konsumsi energi terbarukan, dan kepadatan penduduk yang lebih tinggi berkontribusi pada pengurangan emisi.
17	Justice et al (2024)	The effect of renewable energy on carbon emissions through globalization	Carbon emisi, renewable energy, globalization		The study's findings showed that while renewable energy has no appreciable impact on trade openness, it directly and negatively affects carbon emissions..
18	Tsandra et al (2023)	Pengaruh Konsumsi Energi dan Aktivitas Ekonomi Terhadap Emisi CO ₂ di Negara G20	Emisi CO ₂ , konsumsi energi terbarukan, GDP per kapita, keterbukaan perdagangan	Panel Data Regression	Pada negara Advanced Economies, emisi CO ₂ per kapita dipengaruhi oleh konsumsi energi bahan bakar fosil, konsumsi energi terbarukan, GDP per kapita, dan keterbukaan perdagangan. Sedangkan, emisi CO ₂ di negara Emerging Markets dipengaruhi oleh konsumsi energi bahan bakar fosil, konsumsi energi terbarukan, GDP per kapita, FDI, dan industrialisasi. Negara

19	Khusna & Kusumawardani (2021)	Decomposition of Carbon Dioxide (CO ₂) Emissions in ASEAN Based on Kaya Identity	CO ₂ , GDP per kapita, pipilasi, intensitas energi dan intensitas karbon	Logarithmic Mean Division Index	Empat efek yang diukur dan temuan utama menunjukkan bahwa jumlah penduduk, aktivitas ekonomi, dan faktor intensitas karbon meningkat masing-masing sebesar 293,02 MtCO ₂ , 790,0 MtCO ₂ , dan 195,51 MtCO ₂ . Sementara itu, efek intensitas energi menyebabkan penurunan emisi CO ₂ ASEAN sebesar 283,13 MtCO ₂ .
20	Pratama & Atmanti (2022)	Dampak Industrialisasi Terhadap Emisi CO ₂ di Indonesia	CO ₂ , intensitas karbon, intensitas energi, Produk Domestik Bruto (GDP) dan nilai tambah industri	Vector Error Correction Model	Hasil penelitian menunjukkan adanya pengaruh yang positif signifikan dari intensitas karbon dan intensitas energi terhadap emisi CO ₂ di Indonesia pada jangka panjang, sementara industrialisasi dan GDP per kapita tidak menunjukkan adanya pengaruh yang signifikan. Adapun industrialisasi berpengaruh negatif signifikan lemah terhadap emisi CO ₂ pada jangka pendek, lebih lanjut variabel-variabel lainnya tidak menunjukkan adanya pengaruh yang signifikan.

2.3. Kerangka Pemikiran



Gambar 11. Kerangka Pemikiran

Penelitian ini difokuskan untuk menganalisis bagaimana teknologi, yang direpresentasikan melalui intensitas energi dapat dijadikan sebagai proksi teknologi dalam kerangka model STIRPAT, serta sejauh mana faktor tersebut berpengaruh terhadap peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂). Penggunaan indikator tersebut sebagai pendekatan terhadap variabel teknologi memungkinkan identifikasi yang lebih kompleks dalam menggambarkan proksi teknologi dalam model STIRPAT. Sementara itu, pemilihan negara-negara anggota OECD sebagai objek penelitian didasarkan pada pertimbangan bahwa sebagian besar studi terdahulu lebih banyak berfokus pada negara berkembang atau kawasan seperti ASEAN. Padahal kontribusi negara-negara maju yang tergabung dalam OECD juga sangat signifikan terhadap total emisi global, baik secara historis maupun aktual. OECD dipilih sebagai objek penelitian karena organisasi ini telah lama menjadi pelopor dalam kebijakan lingkungan dan transisi energi, termasuk penerapan pajak karbon, mekanisme perdagangan emisi, serta target net-zero yang ambisius. Selain itu, OECD juga memiliki peran signifikan terhadap konsumsi energi global sekaligus menjadi pusat utama pengembangan teknologi energi bersih, sehingga keberadaannya sangat penting dalam upaya menekan emisi di tingkat internasional. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan literatur dengan memberikan perspektif yang lebih komprehensif mengenai dinamika emisi CO₂ di negara-negara maju yang memiliki peran strategis dalam pengendalian perubahan iklim global.

2.4. Hipotesis

Berdasarkan teori dan studi empiris dari beberapa peneliti, maka dibuat hipotesis penelitian sebagai berikut :

1. Diduga emisi karbon CO₂ tahun sebelumnya berpengaruh positif terhadap emisi karbon CO₂ di negara-negara anggota OECD.
2. Diduga jumlah penduduk berpengaruh positif terhadap emisi karbon CO₂ di negara-negara anggota OECD.
3. Diduga GDP per kapita berpengaruh positif terhadap emisi karbon CO₂ di negara-negara anggota OECD.

4. Diduga intensitas energi berpengaruh positif terhadap emisi karbon CO₂ di negara-negara anggota OECD.
5. Diduga emisi karbon CO₂ tahun sebelumnya, jumlah penduduk, GDP per kapita dan intensitas energi, berpengaruh terhadap emisi karbon CO₂ di negara-negara anggota OECD secara simultan.

III. METODE PENELITIAN

3.1. Jenis Data dan Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini adalah penelitian deskriptif kuantitatif, yaitu jenis penelitian yang bertujuan untuk menggambarkan atau mendeskripsikan karakteristik suatu fenomena atau penduduk dengan menggunakan data kuantitatif. Sedangkan data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang bersumber dari *Global Carbon Project*, *World Bank* dan *Our World in Data*. Penelitian ini menggunakan 3 variabel bebas (*independent variables*) yaitu Jumlah Penduduk dan GDP Per kapita, Intensitas Energi serta variabel terikat (*dependent variable*) yaitu Emisi CO₂. Penelitian ini menggunakan data panel dengan ruang lingkup penelitian mencakup 38 negara anggota OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) sebagai *cross-section* dan *time series* dengan rentang waktu 13 tahun yaitu 2010-2022. Alat analisis yang digunakan adalah *StataMP 17* dan *Eviews 13*.

3.2. Definisi Operasional Variabel

Operasional Variabel merupakan penjabaran tentang batasan variabel yang dimaksud, atau tentang apa yang diukur oleh variabel yang bersangkutan. Operasionalisasi variabel diperlukan untuk menentukan jenis dan indikator dari variabel-variabel yang terkait dalam penelitian. Disamping itu, operasionalisasi variabel juga bertujuan untuk menentukan skala pengukuran dari masing-masing variabel. Secara lebih rinci operasionalisasi variabel dalam penelitian ini dapat dilihat pada penjelasan tabel berikut :

Tabel 3. Definisi Operasional Variabel

No	Variabel	Definisi dan Ukuran	Satuan	Simbol	Sumber
1	Emisi Karbon Dioksida	Jumlah karbon dioksida (CO ₂) yang dipancarkan dari pembakaran bahan bakar fosil, dan langsung dari proses industri seperti produksi semen dan baja. CO ₂ fosil mencakup emisi dari batu bara, minyak, gas, pembakaran, semen, baja, dan proses industri lainnya. Emisi fosil tidak mencakup perubahan penggunaan lahan, penggundulan hutan, tanah, atau vegetasi.	Ton	CO ₂	Global Carbon Project
2	Jumlah Penduduk	Jumlah penduduk adalah estimasi dari semua penduduk yang tinggal di suatu negara atau wilayah pada pertengahan tahun, tanpa memandang status hukum atau kewarganegaraan. Ini mencakup semua penduduk tetap, termasuk warga negara dan penduduk asing.	Jiwa	PT	World Bank
3	GDP Per kapita	GDP per kapita adalah produk domestik bruto (GDP) dibagi dengan jumlah penduduk pada pertengahan tahun. Indikator ini mencerminkan rata-rata pendapatan ekonomi per orang dan sering digunakan sebagai ukuran kasar tingkat kemakmuran atau standar hidup suatu negara.	US Dollar	GDPP	World Bank
4	Intensitas Energi	Tingkat intensitas energi dari energi primer adalah rasio antara pasokan energi dan produk domestik bruto yang diukur berdasarkan paritas daya beli.	Rasio	EI	World Bank

3.3. Metode Analisis

Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode regresi data panel. Metode ini sendiri menggabungkan dua jenis data, yaitu data *time series* dan *cross section*. Menurut Windarjono (2018), data panel memberikan beberapa keuntungan. Pertama, data panel merupakan gabungan dua data *time series* dan *cross section* mampu menyediakan data yang lebih banyak sehingga akan menghasilkan *degree of freedom* yang lebih besar. Kedua, menggabungkan informasi dari data *time series* dan *cross section* dapat mengatasi masalah yang timbul ketika ada masalah penghilangan variabel (*omitted-variabel*).

3.3.1. Regresi Data Panel Dinamis

Untuk menganalisis hubungan dinamis antar variabel dan mengatasi masalah endogenitas yang mungkin timbul, penelitian ini menggunakan metode Generalized Method of Moments (GMM) untuk estimasi regresi panel dinamis. Model panel dinamis dicirikan oleh adanya variabel dependen yang dilag (*lagged dependent variable*) sebagai salah satu prediktor, yang secara inheren menyebabkan korelasi antara variabel dependen yang dilag dengan error term, sehingga estimasi OLS (Ordinary Least Square) akan menghasilkan estimasi yang bias dan tidak konsisten (Arellano & Bond, 1991).

Metode GMM, yang dikembangkan oleh Arellano dan Bond Arellano & Bond (1991) serta Arellano & Bover (1995), dan Blundell & Bond (1998), merupakan pendekatan yang robust untuk mengatasi masalah ini. GMM menggunakan variabel instrumental (*instrumental variables*) yang valid untuk mengestimasi parameter model. Instrumen yang digunakan adalah nilai-nilai lag dari variabel dependen dan variabel independen yang dianggap eksogen atau predetermined.

Secara umum, model regresi panel dinamis dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$Y_{it} = \alpha Y_{i,t-1} + \beta' X_{it} + \mu_{it} + \varepsilon_{it}$$

Karena model yang digunakan bersifat dinamis, dikarenakan memasukkan emisi CO₂ pada periode sebelumnya sebagai salah satu variabel penjelas. Artinya, emisi CO₂ pada suatu tahun dipengaruhi oleh emisi CO₂ pada tahun sebelumnya. Namun, variabel lag emisi CO₂ ini cenderung berkorelasi dengan efek tetap negara, sehingga jika model diestimasi dengan metode Common Effect, Fixed Effect, atau Random Effect, hasilnya akan bias dan tidak konsisten. Selanjutnya maka dibentuk model regresi data panel yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

$$CO_{2\ it} = \alpha CO_{2i,t-1} + \beta_1 PT_{it} + \beta_2 GDPP_{it} + \beta_3 EI_{it} + \mu_{it} + \varepsilon_{it}$$

Namun diketahui bahwa transformasi logaritmik secara empiris telah dibuktikan dapat mengompresi rentang nilai sehingga outlier tidak lagi mendominasi estimasi model, tanpa perlu menghapus data ekstrem (Box & Cox, 1964) (Burbidge et al., 1988). Selain itu, transformasi membuat distribusi data lebih mendekati normal dan menurunkan variabilitas, sehingga membantu memenuhi asumsi homoskedastisitas dalam regresi linear (Feng et al., 2014) (Osborne, 2002). Secara ekonomi, model log juga memudahkan interpretasi koefisien sebagai elastisitas (persentase perubahan), sebuah sifat yang sangat berguna dalam analisis permintaan dan produksi (Shapiro et al, 2019). Maka dibentuklah model logaritma sebagai berikut:

$$\ln CO_{2\ it} = \alpha \ln CO_{2i,t-1} + \beta_1 \ln PT_{it} + \beta_2 \ln GDPP_{it} + \beta_3 \ln EI_{it} + \mu_{it} + \varepsilon_{it}$$

Keterangan :

CO ₂	= Emisi Karbon Dioksida (Ton)
PT	= Jumlah Penduduk (Jiwa)
GDPP	= GDP Per kapita (US Dolar, constant 2015)
EI	= Intensitas Energi (Rasio E/GDP atau MJ per GDP PPP USD)
ln	= logaritma natural
μ _{it}	= mu sub i, efek tetap (fixed effect) yang mewakili karakteristik khusus tiap negara yang tidak selalu berubah sepanjang waktu (misalnya geografi, sistem hukum, budaya dan politik).

ϵ_{it}	= epsilon sub i, error acak (idiosyncratic error), yaitu shock yang berubah untuk setiap negara dan waktu (misalnya krisis ekonomi, bencana alam, perubahan teknologi)
i	= Negara (<i>cross section</i>)
t	= Tahun (<i>time series</i>)

3.4. Prosedur Analisis

Ada dua metode estimasi FD-GMM dan SYS-GMM yaitu model *one-step* dan *two-step*. Model *two step* dianggap lebih efisien dan *robust standard error* terhadap heteroskedastisitas dan autokorelasi (Roodman, 2009). Menurut Ng et al (2010) penggunaan GMM two step meningkatkan efisiensi dibandingkan one step. Artinya, dalam skenario tersebut estimator two step cenderung menghasilkan varians parameter yang lebih kecil (lebih efisien) daripada one step. Walau disini lain kelemahan estimasi standar error GMM two step dapat sangat bias ke bawah, sehingga seringkali direkomendasikan untuk menggunakan standard error yang dikoreksi misalnya, Windmeijer-corrected standard errors (Windmeijer, 2005).

Adapun menurut Bambang Juanda (2021) kriteria model GMM terbaik, sebagai berikut:

1. Instrumen valid, yaitu apabila tidak ada korelasi antara variable instrumen dengan komponen *error*.
2. Konsisten yang diperiksa menggunakan uji autokorelasi untuk mengetahui konsistensi dari hasil estimasi.
3. Tidak bias, di antara penduga FEM dengan penduga PLS.

Sebelum memilih model GMM, akan dilakukan uji endogenitas. Uji endogenitas adalah prosedur dalam ekonometrika untuk menentukan apakah salah satu atau beberapa variabel independen dalam model regresi berkorelasi dengan error term. Jika variabel independen berkorelasi dengan error term, maka estimasi OLS menjadi tidak konsisten dan bias, sehingga perlu menggunakan metode alternatif seperti Instrumental Variables (IV), Two-Stage Least Squares (2SLS), atau Generalized Method of Moments (GMM) (Wooldridge, 2013). Adapun beberapa tahapan prosedur analisis data yang dilakukan dalam penelitian ini, sebagai berikut:

3.4.1. Pemilihan Estimator GMM

a. First-Different GMM (FD-GMM)

First Difference GMM (FD-GMM), yang pertama kali diusulkan oleh Arellano & Bond (1991) adalah pendekatan awal dalam mengatasi masalah endogenitas pada model data panel dinamis. Prinsip utama FD-GMM adalah menghilangkan efek individu yang tidak terobservasi (unobserved individual effects) dengan melakukan transformasi first difference pada semua variabel dalam model. Dengan mengambil perbedaan pertama, efek individu yang konstan sepanjang waktu akan tereliminasi, sehingga persamaan yang dihasilkan bebas dari bias efek individu. Setelah transformasi ini, variabel dependen yang dilag dalam bentuk perbedaan pertama akan menjadi endogen karena berkorelasi dengan error term yang juga telah di-differencing. Untuk mengatasi endogenitas ini, FD-GMM menggunakan nilai-nilai lag dari variabel dependen dalam level (bukan perbedaan pertama) sebagai instrumen. Asumsi kunci di sini adalah bahwa instrumen-instrumen ini valid, yaitu berkorelasi dengan variabel endogen yang diinstrumentasi (relevansi) dan tidak berkorelasi dengan error term yang telah di-differencing (eksogenitas). Arellano & Bond (1991) menekankan bahwa estimator GMM mereka secara optimal memanfaatkan semua batasan momen linier yang berasal dari asumsi tidak adanya autokorelasi serial pada error term, dalam persamaan yang mengandung efek individu, variabel dependen yang dilag, dan tanpa variabel yang sangat eksogen.

Keunggulan utama FD-GMM terletak pada kemampuannya untuk secara efektif menghilangkan efek individu yang tidak terobservasi, yang merupakan sumber bias signifikan dalam estimasi data panel. Selain itu, FD-GMM tidak memerlukan asumsi distribusi spesifik untuk error term, menjadikannya metode yang lebih fleksibel dibandingkan dengan Maximum Likelihood. Namun, FD-GMM memiliki beberapa keterbatasan penting. Salah satu kelemahan utamanya adalah potensi weak instruments ketika variabel dependen sangat persisten atau ketika varians efek individu antar observasi tinggi. Dalam kondisi ini, lag dari variabel dependen dalam level mungkin tidak cukup kuat untuk menjadi instrumen yang efektif bagi variabel

dependen yang dilag dalam bentuk perbedaan pertama. Hal ini dapat menyebabkan bias pada estimasi dan inferensi yang tidak akurat, terutama pada sampel kecil. Selain itu, transformasi first difference dapat memperburuk masalah measurement error dan menghilangkan informasi penting yang terkandung dalam variasi antar individu dalam data panel. Blundell & Bond (1998) mencatat bahwa estimator GMM yang di-first-differenced memiliki bias sampel terbatas yang besar dan presisi yang buruk dalam studi simulasi ketika parameter autoregresif cukup besar dan jumlah observasi deret waktu relatif kecil.

b. System-GMM (SYS-GMM)

Untuk mengatasi kelemahan FD-GMM, terutama masalah weak instruments pada sampel kecil atau ketika variabel sangat persisten, Blundell & Bond (1998) mengembangkan System GMM (SYS-GMM). SYS-GMM merupakan pengembangan dari FD-GMM yang menggabungkan dua set persamaan: persamaan dalam first difference (seperti pada FD-GMM) dan persamaan dalam level. Dengan demikian, SYS-GMM memanfaatkan kondisi momen tambahan yang berasal dari persamaan level, di mana variabel-variabel yang di-differencing digunakan sebagai instrumen. Pendekatan ini secara signifikan meningkatkan efisiensi dan mengurangi bias pada estimasi, terutama ketika variabel dependen mendekati random walk atau memiliki persistensi tinggi. Blundell & Bond (1998) menunjukkan bahwa estimator GMM yang diperluas ini menawarkan peningkatan efisiensi yang dramatis dalam situasi di mana estimator GMM first-differenced dasar berkinerja buruk.

3.4.2. Tahapan Pengujian Panel Dinamis GMM

Dalam estimasi model data panel dinamis menggunakan Generalized Method of Moments (GMM), validitas hasil estimasi sangat bergantung pada keabsahan instrumen yang digunakan dan asumsi mengenai struktur autokorelasi error term. Oleh karena itu, serangkaian uji spesifikasi menjadi krusial untuk memverifikasi asumsi-asumsi ini. Dua uji spesifikasi utama yang secara rutin dilakukan dalam konteks GMM adalah Uji Sargan (atau Uji Hansen) untuk validitas instrumen dan Uji Arellano-Bond untuk mendeteksi autokorelasi serial pada error term. Uji-uji ini

memastikan bahwa model GMM yang diestimasi telah memenuhi persyaratan statistik yang diperlukan untuk menghasilkan estimasi yang konsisten dan efisien.

a. Uji Sargan/Hansen

Uji Sargan, atau lebih umumnya Uji Hansen (ketika menggunakan matriks bobot yang robust terhadap heteroskedastisitas), adalah uji statistik yang digunakan untuk mengevaluasi validitas instrumen yang digunakan dalam estimasi GMM. Uji ini dikenal sebagai uji *overidentifying restrictions* karena menguji apakah kondisi momen tambahan yang digunakan dalam model GMM konsisten dengan data. Hipotesis nol (H_0) dari Uji Sargan/Hansen adalah bahwa semua instrumen adalah valid, yaitu instrumen-instrumen tersebut tidak berkorelasi dengan error term dan karenanya memenuhi kondisi ortogonalitas (Sargan, 1958) (Hansen, 1982). Dengan kata lain, H_0 menyatakan bahwa model GMM telah dispesifikasi dengan benar dan instrumen yang dipilih adalah eksogen. Statistik uji Sargan/Hansen mengikuti distribusi Chi-kuadrat atau chi-square (χ^2) dengan derajat bebas yang sama dengan jumlah kondisi momen dikurangi jumlah parameter yang diestimasi. Interpretasi hasil uji ini sangat penting: jika nilai p (p -value) dari statistik uji lebih besar dari tingkat signifikansi yang ditentukan (misalnya, 0.05 atau 5%), maka kita gagal menolak hipotesis nol. Ini berarti bahwa instrumen yang digunakan dianggap valid dan model GMM dispesifikasi dengan benar. Sebaliknya, jika nilai p kurang dari tingkat signifikansi, hipotesis nol ditolak, menunjukkan bahwa setidaknya ada satu instrumen yang tidak valid atau model memiliki masalah spesifikasi (Sargan, 1958) (Hansen, 1982). Uji Sargan mengasumsikan homoskedastisitas error term. Jika terdapat heteroskedastisitas, Uji Hansen adalah pilihan yang lebih tepat karena robust terhadap heteroskedastisitas. Uji Hansen untuk two-step umumnya lebih robust terhadap heteroskedastisitas dibandingkan uji Sargan, sehingga lebih sering digunakan, terutama pada estimasi GMM two-step (Hansen, 1982). Namun, Uji Hansen juga memiliki kelemahan, yaitu cenderung lemah ketika jumlah instrumen terlalu banyak (*many instruments*), yang dapat menyebabkan nilai p yang terlalu tinggi dan gagal mendeteksi instrumen yang tidak valid (Hansen, 1982).

b. Uji Arellano-Bond

Uji Arellano-Bond untuk autokorelasi serial adalah uji spesifikasi krusial dalam estimasi GMM untuk model data panel dinamis, khususnya untuk memverifikasi asumsi bahwa error term tidak mengalami autokorelasi serial orde kedua. Dalam konteks GMM first-difference, asumsi penting adalah bahwa error term asli (ϵ_{it}) tidak berkorelasi secara serial. Jika error term asli tidak berkorelasi secara serial, maka first difference dari error term $\Delta\epsilon_{it} = \epsilon_{it} - \epsilon_{i,t-1}$ akan menunjukkan autokorelasi serial orde pertama (AR(1)), tetapi tidak autokorelasi serial orde kedua (AR(2)) (Arellano & Bover, 1995). Hipotesis nol (H_0) dari Uji Arellano-Bond untuk AR (1) adalah tidak adanya autokorelasi serial orde pertama pada residual first-difference. Sebaliknya, H_0 dari Uji Arellano-Bond untuk AR (2) adalah tidak adanya autokorelasi serial orde kedua pada residual first difference. Untuk validitas estimator GMM, kita mengharapkan untuk menolak H_0 untuk AR(1) (menunjukkan adanya autokorelasi orde pertama pada residual first-difference, yang konsisten dengan tidak adanya autokorelasi pada error term asli) dan gagal menolak H_0 untuk AR(2) (menunjukkan tidak adanya autokorelasi orde kedua pada residual first difference, yang merupakan kondisi yang diperlukan untuk konsistensi estimator GMM) (Arellano & Bond, 1991). Interpretasi hasil uji ini adalah sebagai berikut: jika nilai p untuk AR (1) signifikan (misalnya, $p < 0.05$), dan nilai p untuk AR (2) tidak signifikan ($p > 0.05$), maka asumsi tidak adanya autokorelasi serial orde kedua pada error term first-difference terpenuhi, dan estimator GMM dianggap konsisten. Jika H_0 untuk AR (2) ditolak ($p < 0.05$), ini mengindikasikan adanya autokorelasi serial orde kedua, yang berarti instrumen yang digunakan tidak valid dan estimasi GMM tidak konsisten. Dalam kasus seperti itu, model perlu dispesifikasi ulang atau instrumen yang lebih dalam perlu dipertimbangkan (Arellano & Bond, 1991).

3.4.3. Long-Run Coefficient

Long run coefficient adalah besarnya pengaruh jangka panjang suatu variabel independen terhadap variabel dependen dalam model dinamis. Konsep ini muncul ketika model GMM dinamis memasukkan variabel dependen yang dilag (lagged

dependent variable). Karena ada lag dari variabel dependen, maka pengaruh X tidak berhenti di satu periode. Dampaknya berlanjut ke periode-periode berikutnya melalui Y_{t-1} . Oleh karena itu dihitung pengaruh total dalam jangka panjang, yang disebut long run coefficient. Rumusnya sebagai berikut:

$$\text{Long Run Coefficient: } \frac{\beta}{1-\alpha}$$

di mana:

- β = koefisien jangka pendek
- α = koefisien lag variabel dependen

Pada model GMM dinamis, menghitung long run coefficient tidak mensyaratkan uji kointegrasi terlebih dahulu, berbeda dengan beberapa pendekatan time series seperti ARDL atau VECM. hubungan jangka panjang diturunkan dari struktur dinamis model, bukan dari hubungan kointegrasi antar variabel. Karena itu secara metodologis tidak wajib melakukan uji kointegrasi sebelum menghitung long run coefficient pada GMM. Model panel dinamis GMM memungkinkan analisis dinamika jangka pendek dan jangka panjang tanpa prosedur kointegrasi seperti pada model time series (Roodman, 2009).

3.4.4. Pengujian Hipotesis

a. Uji Signifikansi Parameter Individual (Uji t)

Uji t dapat dilakukan dengan membandingkan nilai t-tabel dengan t-hitung. Apabila t-hitung lebih besar daripada t-tabel maka dapat ditarik kesimpulan bahwa ada pengaruh antara variabel bebas dengan variabel terikat secara parsial.

Dengan ketentuan sebagai berikut:

Jika $t\text{-hitung} < t\text{-tabel}$ maka H_0 diterima dan H_a ditolak.

Jika $t\text{-hitung} > t\text{-tabel}$ maka H_0 ditolak dan H_a diterima

H_0 : tidak ada pengaruh signifikan

H_a : ada pengaruh signifikan

Dalam penelitian ini, uji-t sebagai berikut:

$CO_{2i,t-1}$

$H_0 : \beta_1 \leq 0$, artinya variable $CO_{2i,t-1}$ tidak berpengaruh positif terhadap CO_2

$H_a : \beta_1 > 0$, artinya variabel $CO_{2i,t-1}$ berpengaruh positif terhadap CO_2

PT (Jumlah Penduduk)

$H_0 : \beta_2 \leq 0$, artinya variabel PT tidak berpengaruh positif terhadap CO_2

$H_a : \beta_2 > 0$, artinya variabel PT berpengaruh positif terhadap CO_2

GDPP (GDP Per kapita)

$H_0 : \beta_3 \leq 0$, artinya variabel GDPP tidak berpengaruh positif terhadap CO_2

$H_a : \beta_3 > 0$, artinya variabel GDPP berpengaruh positif terhadap CO_2

EI (Intensitas Energi)

$H_0 : \beta_4 \leq 0$, artinya variabel EI tidak berpengaruh positif terhadap CO_2

$H_a : \beta_4 > 0$, artinya variabel EI berpengaruh positif terhadap CO_2

b. Uji Signifikansi Simultan (Uji F)

Uji F digunakan berguna untuk melihat apakah keseluruhan variabel bebas berpengaruh terhadap variabel terikat. Uji F dilakukan dengan cara melihat perbandingan nilai F-tabel dengan F-hitung. Apabila F-hitung lebih besar daripada F-tabel maka dapat ditarik kesimpulan bahwa ada pengaruh antara variabel bebas dengan dengan variabel terikat secara simultan. Dengan hipotesis sebagai berikut :

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$

$H_a : \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq 0$

Dimana :

H_0 : variabel bebas tidak ada pengaruh dengan variabel terikat

H_a : variabel bebas ada pengaruh dengan variabel terikat

Dengan penjelasan sebagai berikut :

Jika $F\text{-hitung} < F\text{-tabel}$ maka H_0 diterima dan H_a ditolak artinya bahwa variabel bebas secara bersama-sama berpengaruh negatif terhadap variabel terikat.

Jika $F\text{-hitung} > F\text{-tabel}$ maka H_0 ditolak dan H_a diterima artinya bahwa variabel bebas secara bersama-sama berpengaruh positif terhadap variabel terikat.

3.4.4. Keseimbangan Konvergen

Keseimbangan konvergen dalam konteks model dynamic panel data merujuk pada kondisi di mana variabel dependen memiliki kecenderungan untuk kembali menuju keadaan keseimbangannya setelah mengalami suatu guncangan (shock). Hal ini ditunjukkan oleh nilai koefisien lag variabel dependen yang lebih kecil dari satu (< 1). Jika syarat tersebut terpenuhi, maka sistem dikatakan stabil dan proses dinamis yang terjadi bersifat konvergen menuju titik keseimbangan jangka panjang (*steady state*). Sebaliknya, apabila koefisien lag sama dengan atau lebih besar dari satu, maka model dianggap tidak konvergen, sehingga variabel dependen cenderung bersifat persisten atau bahkan divergen.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

- a. Variabel Emisi CO₂ lag 1 berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂ di negara-negara OECD selama tahun penelitian, yaitu 2010-2022, dengan nilai koefisien regresi sebesar 0,7489. Nilai half-life sebesar 2,39 mengindikasikan bahwa diperlukan waktu sekitar dua tahun agar dampak suatu guncangan berkurang hingga setengahnya. Temuan statistik ini menegaskan hasil dalam penelitian bahwa emisi CO₂ memiliki sifat yang sangat persisten, sehingga proses penyesuaiannya terhadap guncangan berlangsung secara lambat.
- b. Variabel jumlah penduduk berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂ dengan koefisien regresi sebesar 0,2380 dan koefisien jangka panjang sebesar 0,9480. Pengaruh variabel penduduk (P) di negara-negara OECD tidak semata-mata ditentukan oleh besarnya populasi, melainkan oleh skala aktivitas ekonomi yang menyertainya. Dengan demikian, meskipun pertumbuhan penduduk relatif terbatas, tambahan populasi tersebut tetap berpotensi meningkatkan emisi karena dikombinasikan dengan tingkat kemakmuran (A) yang tinggi. Namun demikian, proses transisi energi serta kemajuan teknologi (T) yang berlangsung di negara-negara OECD secara bertahap menahan laju pertumbuhan emisi, sehingga keterkaitan antara pertumbuhan penduduk dan emisi CO₂ menjadi lebih moderat dibandingkan periode sebelumnya.
- c. Variabel GDP per kapita berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂ dengan koefisien regresi sebesar 0,0587 dan koefisien jangka sebesar 0,2340 namun tidak signifikan. Pada STIRPAT, Ketika GDP per kapita meningkat, kebutuhan dan konsumsi energi masyarakat juga bertambah,

baik untuk transportasi, kegiatan produksi, maupun penggunaan listrik di sektor rumah tangga dan lain-lain. Apabila pasokan energi masih didominasi oleh bahan bakar fosil, peningkatan aktivitas ekonomi tersebut akan berdampak langsung pada kenaikan emisi CO₂. Oleh karena itu, dalam kerangka STIRPAT, GDP per kapita dapat berperan sebagai faktor yang memperbesar maupun menekan emisi CO₂, bergantung pada sejauh mana teknologi dan kebijakan mampu mengimbangi dampak dari peningkatan aktivitas ekonomi.

- d. Variabel Intensitas Energi berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂ dengan koefisien regresi sebesar 0,2706 dan koefisien jangka Panjang sebesar 1,0781. Dampak intensitas energi terhadap emisi CO₂ sangat bergantung pada struktur bauran energi dan karakteristik ekonomi suatu negara. Pada negara yang masih didominasi oleh energi fosil, penurunan intensitas energi tidak selalu diikuti oleh penurunan emisi karena tingginya kandungan karbon dari sumber energi tersebut. Sebaliknya, ketika suatu negara mulai beralih ke energi terbarukan, hubungan antara intensitas energi dan emisi CO₂ cenderung melemah, karena peningkatan konsumsi energi tidak lagi secara langsung meningkatkan emisi karbon. Namun, intensitas energi dapat tetap tinggi apabila struktur ekonomi masih berfokus pada sektor industri berat, yang mengonsumsi energi dalam jumlah besar tetapi menghasilkan nilai tambah ekonomi relatif lebih rendah dibandingkan sektor jasa. Kondisi ini diperkuat oleh skala ekonomi yang kecil, sehingga GDP nasional terbatas dan konsumsi energi tampak besar ketika dibandingkan dengan GDP. Intensitas energi yang tinggi tidak serta-merta bertentangan dengan transisi energi hijau, melainkan mencerminkan pemanfaatan energi terbarukan murah untuk menopang sektor-sektor yang secara struktural sangat padat energi, bukan akibat inefisiensi atau ketergantungan pada energi fosil.

5.2. Saran

- a. Emisi CO₂ di negara-negara OECD bersifat persisten dan menyesuaikan diri secara lambat terhadap guncangan, kebijakan mitigasi emisi di negara OECD perlu dirancang secara jangka panjang, konsisten, dan terkoordinasi. Tingginya pengaruh emisi masa lalu menunjukkan bahwa kebijakan yang bersifat sementara atau tidak berkelanjutan cenderung kurang efektif dalam menurunkan emisi secara signifikan. Oleh karena itu, negara-negara OECD disarankan untuk memperkuat transformasi struktural menuju ekonomi rendah karbon, khususnya melalui percepatan transisi energi, peningkatan efisiensi energi, serta pengurangan ketergantungan pada energi fosil. Selain itu, keterlambatan implementasi kebijakan berpotensi memperkuat lintasan emisi tinggi yang sulit dikoreksi, sehingga tindakan mitigasi yang lebih dini menjadi sangat penting.
- b. Pertumbuhan penduduk di negara-negara OECD tetap berkontribusi positif terhadap emisi CO₂ melalui skala aktivitas ekonomi dan tingkat kemakmuran yang tinggi, maka kebijakan pengendalian emisi tidak cukup hanya berfokus pada aspek demografis, tetapi perlu diarahkan pada pengelolaan pola konsumsi dan aktivitas ekonomi yang menyertai pertumbuhan penduduk. Negara-negara OECD disarankan untuk memperkuat transisi energi dan adopsi teknologi rendah karbon guna menekan tambahan emisi yang muncul seiring peningkatan aktivitas ekonomi akibat pertumbuhan populasi. Upaya ini menjadi penting karena meskipun laju pertumbuhan penduduk relatif terbatas, dampaknya terhadap emisi tetap signifikan ketika dikombinasikan dengan tingkat pendapatan dan konsumsi energi yang tinggi.
- c. Peningkatan GDP per kapita di negara-negara OECD berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂, kebijakan pengendalian emisi perlu diarahkan agar pertumbuhan ekonomi tidak selalu diikuti oleh peningkatan konsumsi energi berbasis fosil. Mengingat tingginya tingkat kemakmuran di negara OECD, peningkatan aktivitas ekonomi berpotensi meningkatkan emisi apabila tidak diimbangi oleh kebijakan dan teknologi yang memadai.

Negara-negara OECD disarankan untuk memperkuat peran teknologi dalam mengarahkan pertumbuhan ekonomi menuju jalur rendah karbon, melalui percepatan transisi energi, peningkatan efisiensi energi, serta pengembangan teknologi bersih. Sehingga pertumbuhan GDP per kapita dapat berfungsi sebagai faktor yang menekan, bukan memperbesar emisi CO₂.

- d. Intensitas energi berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂ di negara-negara OECD, kebijakan pengendalian emisi tidak cukup hanya berfokus pada penurunan intensitas energi secara agregat, tetapi perlu mempertimbangkan struktur bauran energi dan karakteristik ekonomi masing-masing negara. Pada negara OECD yang masih bergantung pada energi fosil, upaya peningkatan efisiensi energi perlu diiringi dengan percepatan peralihan ke sumber energi rendah karbon agar penurunan intensitas energi dapat diikuti oleh penurunan emisi. Sebaliknya, pada negara OECD yang telah memiliki penetrasi energi terbarukan yang tinggi, intensitas energi yang relatif besar tidak selalu mencerminkan inefisiensi, melainkan dapat berkaitan dengan dominasi sektor industri padat energi atau keterbatasan skala ekonomi. Sehingga, kebijakan di negara-negara OECD sebaiknya diarahkan pada transformasi struktural ekonomi dan dekarbonisasi sektor industri, bukan semata-mata menekan konsumsi energi.
- e. Berdasarkan temuan bahwa seluruh variabel dalam kerangka model STIRPAT secara simultan berpengaruh terhadap emisi CO₂ di negara-negara OECD, kebijakan pengendalian emisi perlu dirancang secara komprehensif dan terintegrasi, bukan bersifat parsial. Pengendalian emisi tidak dapat hanya difokuskan pada satu faktor tertentu, melainkan harus mempertimbangkan keterkaitan antara dinamika penduduk, pertumbuhan ekonomi dan intensitas energi serta kemajuan teknologi. Oleh karena itu, negara-negara OECD disarankan untuk mengharmonisasikan kebijakan ekonomi, energi, dan lingkungan agar saling mendukung dalam menekan emisi CO₂. Pendekatan kebijakan yang terkoordinasi ini penting untuk

memastikan bahwa pertumbuhan ekonomi dan aktivitas sosial dapat berlangsung secara berkelanjutan tanpa memperkuat tekanan terhadap lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arellano, M., & Bond, S. (1991). Some Tests of Specification for Panel Data: Monte Carlo Evidence and an Application to Employment Equations. *The Review of Economic Studies*, 58(2), 277–297. <https://doi.org/10.2307/2297968>
- Arellano, M., & Bover, O. (1995). Another look at the instrumental variable estimation of error-components models. *Journal of Econometrics*, 68(1), 29–51. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-4076\(94\)01642-D](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-4076(94)01642-D)
- Assaf, M. A. (2023). the Influence of Environmental Tax and Technology on Different Air Pollution Emissions in Oecd Countries. *BAU Journal - Creative Sustainable Development*, 4(2). <https://doi.org/10.54729/2789-8334.1106>
- Ballester, J., Quijal-Zamorano, M., Méndez Turrubiates, R. F., Pegenaute, F., Herrmann, F. R., Robine, J. M., Basagaña, X., Tonne, C., Antó, J. M., & Achebak, H. (2023). Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. *Nature Medicine*, 29(7), 1857–1866. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02419-z>
- Barile, S., Quattrocioni, B., Calabrese, M., & Iandolo, F. (2018). Sustainability and the Viable Systems Approach: Opportunities and Issues for the Governance of the Territory. *Sustainability Journals Volume 10*, 3.
- Blundell, R., & Bond, S. (1998a). Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models. *Journal of Econometrics*, 87(1), 115–143. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-4076\(98\)00009-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-4076(98)00009-8)
- Blundell, R., & Bond, S. (1998b). *Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models*. 87.
- Box, G. E. P., & Cox, D. R. (1964). An Analysis of Transformations. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 26(2), 211–243. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x>
- Bui Minh, T., Nguyen Ngoc, T., & Bui Van, H. (2023). Relationship between carbon emissions, economic growth, renewable energy consumption, foreign direct investment, and urban population in Vietnam. *Heliyon*, 9(6), e17544. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17544>

- Burbidge, J. B., Magee, L., & Robb, A. L. (1988). Alternative transformations to handle extreme values of the dependent variable. *Journal of the American Statistical Association*, 83(401), 123–127. <https://doi.org/10.1080/01621459.1988.10478575>
- Cristy, A. H., & Sakti, R. K. (2022). Pertumbuhan Ekonomi Dan Emisi Karbon Analisis Hipotesis Environmental Kuznets Curve (Ekc) Pada Negara High Income Di Kawasan Asean Tahun 1998-2018. *JDESS Journal of Development Economic and Social Studies*, 1(4), 520–528.
- Danish, Hassan, S. T., & Khan, I. (2025). Achieving net-zero carbon emission targets in OECD countries: The role of the energy transition, institutional quality, and green technological innovation. *Gondwana Research*, 144, 20–32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gr.2025.03.012>
- David, H. N. (2010). Public Finance: A Contemporary Application of Theory to Policy. *Public Finance: A Contemporary Application of Theory to Policy*, April, 259–310. <https://www.uv.mx/personal/clelanda/files/2014/09/Hyman-David-2011-Public-Finance.pdf>
- Dian, R. (2016). Indonesian Treasury Review Carbon Tax Sebagai Alternatif Kebijakan Mengatasi Eksternalitas Negatif Emisi Karbon Di Indonesia. *Perbendaharaan, Keuangan Negara Dan Kebijakan Publik*, 53–67.
- Dogan, E., & Shah, S. F. (2022). Analyzing the role of renewable energy and energy intensity in the ecological footprint of the united arab emirates. *Sustainability (Switzerland)*, 14(1), 1–12. <https://doi.org/10.3390/su14010227>
- Du, Z., Xu, J., & Lin, B. (2024). What does the digital economy bring to household carbon emissions? – From the perspective of energy intensity. *Applied Energy*, 370, 123613. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123613>
- Feng, C., Wang, H., Lu, N., Chen, T., He, H., Lu, Y., & Tu, X. M. (2014). Log-transformation and its implications for data analysis. *Shanghai Archives of Psychiatry*, 26(2), 105–109. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0829.2014.02>
- Flanders, S. of T. A. (2023). *LIFE SCIENCES IRELAND*.
- GAMMA. (2011). *Landsvirkjun`s Renewable Energy Potential and its Impact.pdf*.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). *Environmental impacts of a North American free trade agreement*. 3914.
- Gruber, J. (2010). Public Finance and Public Policy. In *Computer Fraud and Security* (Third Edit, Vol. 2007). Worth Publishers. [https://doi.org/10.1016/S1361-3723\(07\)70079-9](https://doi.org/10.1016/S1361-3723(07)70079-9)
- Hansen, L. P. (1982). Large Sample Properties of Generalized Method of Moments

- Estimators. In *JSTOR* (Vol. 50, Issue 4, pp. 1029–1054).
- Helbling, T. (2020). Externalities : Prices Do Not Capture All Costs There are differences between private returns or costs and the costs or returns to society as a whole. *International Monetary Fund*.
- Hikmat, H. (2000). Analisis Dampak Lingkungan Sosial: Strategi Menuju Pembangunan Berpusat Pada Rakyat (People Centred Development). *Andalsos: Pascasarjana Manajemen Pembangunan*.
- Hong, S., Hui, E. C. M., & Lin, Y. (2022). Relationships between carbon emissions and urban population size and density, based on geo-urban scaling analysis: A multi-carbon source empirical study. *Urban Climate*, 46, 101337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101337>
- Huylo, M., Taheri, S., & Novoselac, A. (2025). Integration of renewable energy generation and storage systems for emissions reduction in an islanded campus microgrid. *Building and Environment*, 274, 112736. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112736>
- IDA Ireland. (2025). *Key players in Ireland's pharmaceutical manufacturing space*. <https://www.ida-ireland.es/latest-news/insights/pharmaceutical-manufacturing-companies-ireland>
- Indrianti, Tyas, Yusmiati, Santoso, B. (2022). Pembangunan Berkelanjutan. *LLPPM UPN VETERAN YOYAKARTA* 951–952., 1–19.
- Islami, F. S., Prasetyanto, P. K., & Kurniasari, F. (2022). The Effect of Population, GDP, Non-Renewable Energy Consumption and Renewable Energy Consumption on Carbon Dioxide Emissions in G-20 Member Countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(2), 103–110. <https://doi.org/10.32479/ijeep.12548>
- Jiang, W., Chen, S., Tang, P., Hu, Y., Liu, M., Qiu, S., & Iqbal, M. (2024). Role of natural resources, renewable energy sources, eco-innovation and carbon taxes in carbon neutrality: Evidence from G7 economies. *Heliyon*, 10(13), e33526. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33526>
- Juanda, B. (2021). *Model Data Panel Dinamis Model Data Panel Dinamis*.
- Justice, G., Nyantakyi, G., & Hayford, S. (2024). Heliyon The effect of renewable energy on carbon emissions through globalization. *Heliyon*, 10(5), e26894. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26894>
- Kaya, Y. (1990). *地球環境問題と経済発展*.
- Keeble, B. R. (1988). The Brundtland Report: “Our Common Future.” *Medicine and War*, 4(1), 17–25. <https://doi.org/10.1080/07488008808408783>

- Khusna, V. A., & Kusumawardani, D. (2021). Decomposition of Carbon Dioxide (CO₂) Emissions in ASEAN Based on Kaya Identity. *Indonesian Journal of Energy*, 4(2), 101–114.
- Levin, A., Lin, C.-F., & James Chu, C.-S. (2002). Unit root tests in panel data: asymptotic and finite-sample properties. *Journal of Econometrics*, 108(1), 1–24. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-4076\(01\)00098-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-4076(01)00098-7)
- Liang, D., Lu, H., Guan, Y., Feng, L., He, L., Qiu, L., & Lu, J. (2023). Population density regulation may mitigate the imbalance between anthropogenic carbon emissions and vegetation carbon sequestration. *Sustainable Cities and Society*, 92, 104502. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104502>
- Lohwasser, J., & Schaffer, A. (2023). The varying roles of the dimensions of affluence in air pollution: a regional STIRPAT analysis for Germany. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(8), 19737–19748. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23519-2>
- Ma, B., & Ogata, S. (2024). Impact of Urbanization on Carbon Dioxide Emissions—Evidence from 136 Countries and Regions. *Sustainability*, 16(18), 7878. <https://doi.org/10.3390/su16187878>
- Mangkoesoebroto, G. (1994). *Ekonomi Publik* (Edisi Ket). BPFE-YOGYAKARTA.
- Marra, A., Colantonio, E., Cucculelli, M., & Nissi, E. (2024). The ‘complex’ transition: Energy intensity and CO₂ emissions amidst technological and structural shifts. Evidence from OECD countries. *Energy Economics*, 136(October 2023), 107702. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107702>
- Mason, R., & Swanson, T. (2002). The costs of uncoordinated regulation. *European Economic Review*, 46(1), 143–167. [https://doi.org/10.1016/S0014-2921\(01\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0014-2921(01)00087-3)
- Methmini, D., Dharmapriya, N., Edirisinghe, S., Gunawardena, V., Jayathilaka, R., Wickramaarachchi, C., & Dharmasena, T. (2025). Economic and trade determinants of carbon emissions in the American region. *Environmental Challenges*, 19(March), 101140. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101140>
- Mukhlis, I. (2009). Eksternalitas, Pertumbuhan Ekonomi dan Pembangunan Berkelanjutan dalam Perspektif Teoritis. *Jurnal Ekonomi Bisnis*.
- Nadeak, S. A. H., & Nasrudin, N. (2023). Pengaruh PDB per Kapita dan Konsumsi Energi terhadap Emisi GRK di Indonesia. *Jurnal Ekonomi Dan Pembangunan Indonesia*, 23(2), 128–145. <https://doi.org/10.21002/jepi.2023.09>
- Nasrudin, R. (2013). *Eksternalitas & Barang Publik*. 1–21.

- Ng, S. W., Norton, E. C., Guilkey, D. K., & Popkin, B. M. (2010). ESTIMATION OF A DYNAMIC MODEL OF WEIGHT. *NATIONAL BUREAU OF ECONOMIC RESEARCH*, 167–186.
- Ochi, A., & Saidi, A. (2024). Impact of governance quality, population and economic growth on greenhouse gas emissions: An analysis based on a panel VAR model. *Journal of Environmental Management*, 370, 122613. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122613>
- OECD. (2024). *Progress in national climate policy efforts remains insufficient to achieve 2030 targets*. Oecd.Org. <https://www.oecd.org/en/about/news/press-releases/2024/11/progress-in-national-climate-policy-efforts-remains-insufficient-to-achieve-2030-targets.html#:~:text=According to the 4th edition,IPCC>
- Osborne, J. (2002). Notes on the Use of Data Transformations. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 8.
- Prasad, M. N. V. (2024). *Chapter 1 - Bioremediation, bioeconomy, circular economy, and circular bioeconomy—Strategies for sustainability* (M. N. V. B. T.-B. and B. (Second E. Prasad (ed.); pp. 3–32). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-443-16120-9.00025-X>
- Pratama, A., & Atmanti, H. D. (2022). DAMPAK INDUSTRIALISASI TERHADAP EMISI CO2 DI INDONESIA. *Universitas Diponegoro*. <https://repofeb.undip.ac.id/10536>
- Puntoon, W., Tarkhamtham, P., & Tansuchat, R. (2022). The impacts of economic growth, industrial production, and energy consumption on CO2 emissions: A case study of leading CO2 emitting countries. *Energy Reports*, 8, 414–419. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.219>
- Quan, Z., Xu, X., Jiang, J., Wang, W., & Gao, S. (2024). Uncovering the drivers of ecological footprints: A STIRPAT analysis of urbanization, economic growth, and energy sustainability in OECD countries. *Journal of Cleaner Production*, 475, 143686. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143686>
- Rahadian, A. (2016). Strategi Pembangunan Berkelanjutan. *Prosiding Seminar STIAMI*, III(01), 46–56. <https://adoc.pub/strategi-pembangunan-berkelanjutan-ah-rahadian-institut-ilmu.html>
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2023). *CO₂ and Greenhouse Gas Emissions*. OurWorldinData.Org. <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions#article-citation>
- Roodman, D. (2009a). *How to do xtabond2 : An introduction to difference and system GMM in Stata. 1*, 86–136.

- Roodman, D. (2009b). Practitioners' corner: A note on the theme of too many instruments. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 71(1), 135–158. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.2008.00542.x>
- Salim, E. (2010). *1000 Gagasan Pembangunan Ekonomi Tanpa Merusak Lingkungan*. 1–11.
- Sargan, J. D. (1958). The Estimation of Economic Relationships using Instrumental Variables. *Econometrica*, 26(3), 393–415. <https://doi.org/10.2307/1907619>
- Sari, I., & Karimi, K. (2023). PENGARUH PERTUMBUHAN EKONOMI, JUMLAH PENDUDUK DAN KONSUMSI ENERGI TERHADAP DEGRADASI LINGKUNGAN DI INDONESIA. *Jurnal Cakrawala Hukum*.
- Sari, V. K. (2022). The impact of macroeconomic indicators on carbon emission in Indonesia. *Jurnal Perspektif Pembiayaan Dan Pembangunan Daerah*, 10(1), 53–62. <https://doi.org/10.22437/ppd.v10i1.17532>
- Shapiro, J. P., Attanasio, O., Banerjee, A., Bertrand, M., & Black, S. (2019). Evidence From Unconditional Cash Transfer in Kenya. *NATIONAL BUREAU OF ECONOMIC RESEARCH*.
- Steward, R., & Krier, J. E. (1978). Environmental Law and Policy. *Indiana Polis: The Bobbs Merrill Co. Inc.*
- Tao, M., Lin, B., & Poletti, S. (2025). Deciphering the impact of electric vehicles on carbon emissions: Some insights from an extended STIRPAT framework. *Energy*, 316(November 2024), 134473. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134473>
- Tsandra, N. A., Sunaryo, R. P., Syafri, S., & Octaviani, D. (2023). Pengaruh Konsumsi Energi dan Aktivitas Ekonomi Terhadap Emisi CO₂ di Negara G20. *E-Journal Ekonomi Bisnis Dan Akuntansi*, 10(2), 69. <https://doi.org/10.19184/ejeba.v10i2.39278>
- Virdausya, S., Balafif, M., & Imamah, N. (2020). Dampak Eksternalitas Industri Tahu Terhadap Pendapatan Desa Tropodo Kecamatan Krian Kabupaten Sidoarjo. *Bharanomics*, 1(1), 1–8. <https://doi.org/10.46821/bharanomics.v1i1.11>
- Weber, H., & Sciubba, J. D. (2019). The Effect of Population Growth on the Environment: Evidence from European Regions. *European Journal of Population*, 35(2), 379–402. <https://doi.org/10.1007/s10680-018-9486-0>
- Wei, H., & Lahiri, R. (2022). Urbanization, energy-use intensity and emissions: A sectoral approach. *Economic Analysis and Policy*, 76, 667–684. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eap.2022.09.001>

- Winarto, Y., Setyaningsih, W., & Yuliani, S. (2019). SUSTAINABLE ECOLOGICAL TOURISM REGIONAL OF DISASTER RESPONSE IN PACITAN, EAST JAVA. *ARSITEKTURA*, 17, 141. <https://doi.org/10.20961/arst.v17i1.24476>
- Windarjono, A. (2018). *Ekonometrika* (5th ed.). UPP STIM YKPN.
- Windmeijer, F. (2005). A finite sample correction for the variance of linear efficient two-step GMM estimators. *Journal of Econometrics*, 126(1), 25–51. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2004.02.005>
- Wooldridge, J. M. (2013). *Introductory Econometrics: A Modern Approach* (5th ed.). Boston: Cengage Learning.
- Xiu, G. (2025). Analyzing the impact of supply chain and digitalization in the Chinese economy: What is the role of energy consumption, government expenditure, and industrialization in environmental pollution? *Energy Economics*, 145, 108412. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108412>
- Xuan, V. N. (2025). Environmental and Sustainability Indicators Nexus of FDI , GDP , renewable energy , trade openness , and environmental pollution in Japan : New evidence from ARDL method. *Environmental and Sustainability Indicators*, 26(April), 100677. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100677>
- Yilmaz, E., & Sensoy, F. (2022). Effects of Fossil Fuel Usage in Electricity Production on CO2 Emissions: A STIRPAT Model Application on 20 Selected Countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(6), 224–229. <https://doi.org/10.32479/ijeep.13707>
- York, R., Rosa, E. A., & Dietz, T. (2003). STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 46(3), 351–365. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(03\)00188-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00188-5)