Environmental Kuznets Curve pada Emisi CO_2 Negara OECD High Income Eropa

Vebyanti Wulandhari[1], Arivina Ratih Yulihar Taher[2]
Program Studi Ekonomi Pembangunan,Fakultas Ekonomi Dan Bisnis,Universitas Lampung, Bandar Lampung[1,2]
vebyantiwulandhari@gmail.com[1], arivina.ratih@feb.unila.ac.id[2]

Abstract
Purpose: This study examines the validity of the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis and analyzes the factors affecting carbon dioxide emissions in 26 OECD high-income European countries during 2000–2024. It investigates how GDP per capita, energy use, and trade openness relate to environmental quality**.**
Methodology/approach: The study uses secondary panel data from 26 OECD high-income European countries for 2000–2024. The long-run relationship among the variables is estimated with the Fully Modified Ordinary Least Squares (FMOLS) method, which serves as the baseline long-run cointegration estimator. The dependent variable is carbon dioxide emissions per capita, and the independent variables are GDP per capita, energy use, and trade openness. The EKC hypothesis is tested by including GDP per capita in both linear and squared forms**.**
Results/Findings: The FMOLS results support the EKC hypothesis in the sampled countries, showing an inverted U-shaped relationship between economic growth and CO_2 emissions. Emissions tend to rise in the early stages of development and ease as income continues to grow. Energy use has a positive and statistically significant relationship with CO_2 emissions, whereas trade openness has a negative and statistically significant relationship. The estimated turning point is indicative, and most countries in the sample appear to lie beyond it.
Limitations: The study covers only OECD high-income European countries for 2000–2024. First-generation panel tests are used, so cross-sectional dependence is not accommodated. Energy use is not disaggregated by source, and technological innovation, environmental policy, energy transition, and industrial structure are not included in the model.
Contribution: The study provides long-run evidence on economic growth, energy use, trade openness, and carbon emissions for developed countries with relatively similar economic characteristics. Higher income does not automatically improve environmental quality; energy efficiency and sustainable economic policies remain necessary.

Keywords: *CO_2 emissions, Energy Use, Environmental Kuznets Curve, GDP per capita, Trade Openness.*

Abstrak
Tujuan: Penelitian ini menguji keberlakuan hipotesis Environmental Kuznets Curve (EKC) dan menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi emisi karbon dioksida (CO_2) pada 26 negara OECD berpendapatan tinggi di Eropa selama periode 2000–2024. Hubungan yang ditelaah mencakup GDP per kapita, energy use, dan trade openness terhadap kualitas lingkungan.
Metode: Penelitian ini menggunakan data panel sekunder dari 26 negara OECD high income Eropa tahun 2000–2024. Hubungan jangka panjang antarvariabel diestimasi dengan metode Fully Modified Ordinary Least Squares (FMOLS) sebagai estimator dasar (baseline) untuk kointegrasi jangka panjang. Variabel terikatnya adalah emisi CO_2 per kapita, sedangkan variabel bebasnya meliputi GDP per kapita, energy use, dan trade openness. Hipotesis EKC diuji dengan memasukkan GDP per kapita dalam bentuk linear dan kuadrat.
Hasil utama: Hasil estimasi FMOLS mendukung hipotesis EKC pada kelompok negara yang diteliti, ditandai dengan pola U terbalik antara pertumbuhan ekonomi dan emisi CO_2. Emisi cenderung meningkat pada tahap awal pembangunan, kemudian mereda seiring kenaikan pendapatan. Energy use berhubungan positif dan signifikan dengan emisi CO_2, sedangkan trade openness berhubungan negatif

dan signifikan. Titik balik yang diperoleh bersifat indikatif, dan sebagian besar negara dalam sampel tampaknya sudah berada di sisi kurva yang menurun.
Implikasi: Pendapatan yang tinggi tidak otomatis memperbaiki kualitas lingkungan. Efisiensi energi, peralihan ke sumber rendah karbon, dan pemanfaatan keterbukaan perdagangan sebagai saluran alih teknologi bersih perlu diprioritaskan. Pengalaman negara maju Eropa dapat menjadi rujukan bagi negara berkembang, dengan tetap memperhatikan perbedaan kondisi ekonomi dan kelembagaan.

Kata kunci: emisi CO_2, *energy use*, *Environmental Kuznets Curve*, GDP per kapita, trade openness.

1. Pendahuluan

Pemanasan global telah menjadi persoalan lintas negara yang mempertemukan urusan ekonomi dengan kelestarian bumi. Suhu rata-rata yang terus naik, pola cuaca yang bergeser, dan kejadian ekstrem yang kian sering menunjukkan bahwa aktivitas manusia membebani sistem alam. Penyebab utamanya adalah menumpuknya gas rumah kaca di atmosfer, dengan karbon dioksida (CO_2) sebagai kontributor terbesar yang terutama berasal dari pemakaian bahan bakar fosil untuk energi, industri, dan angkutan. Menurut Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2023), pemanasan sejak era praindustri sebagian besar disebabkan oleh emisi gas rumah kaca akibat ulah manusia, dan sektor energi termasuk sumber terbesarnya karena pasokan energi dunia belum lepas dari bahan bakar fosil. Dengan demikian, persoalan iklim tidak dapat dipisahkan dari jalannya pembangunan.

Pertumbuhan ekonomi umumnya menandakan naiknya produksi, penghasilan, dan kesejahteraan. Akan tetapi, produksi dan konsumsi yang membesar menuntut energi lebih banyak, dan bila energi itu berasal dari bahan bakar fosil, jejak karbon ikut menebal. Hubungan semacam ini terlihat pada kajian di Asia. Bukti untuk Indonesia menunjukkan adanya keterkaitan dua arah antara konsumsi energi dan emisi CO_2 (Lismiyah et al., 2024), sedangkan di kawasan ASEAN pertumbuhan GDP dan pertumbuhan industri sama-sama berasosiasi positif dengan emisi (Gunarto et al., 2025). Sebaliknya, negara yang kian makmur memiliki ruang untuk menanamkan modal pada teknologi bersih, menghemat energi, dan memperketat aturan lingkungan. Tang et al. (2025) mengingatkan bahwa hubungan antara pertumbuhan dan kerusakan lingkungan tidak seragam, sebab ditentukan oleh ciri wilayah, tahap pembangunan, susunan energi, kemampuan teknologi, dan arah kebijakan. Untuk kelompok OECD, Vo et al. (2022) menganalisis pertumbuhan, energi, dan lingkungan sebagai satu jaringan hubungan yang saling berkaitan.

Selain konsumsi energi, dinamika pertumbuhan ekonomi juga berkaitan dengan pembentukan modal dan kondisi ketenagakerjaan. Pada 62 daerah tertinggal di Indonesia selama 2017–2021, Teralsyah & Ratih (2022), menemukan bahwa Pembentukan Modal Tetap Bruto (PMTB) berpengaruh positif dan signifikan terhadap pertumbuhan ekonomi, sedangkan Tingkat Partisipasi Angkatan Kerja (TPAK) menunjukkan pengaruh positif tetapi tidak signifikan. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa pertumbuhan ekonomi terbentuk melalui sejumlah faktor produksi dan investasi. Namun, karena penelitian tersebut berfokus pada pertumbuhan ekonomi daerah dan tidak menguji emisi karbon, hasilnya digunakan sebagai konteks mengenai faktor pendorong pertumbuhan, bukan sebagai bukti langsung hubungan antara investasi dan emisi CO_2.

Laporan International Energy Agency (IEA, 2024) mencatat bahwa emisi CO_2 dari sektor energi dunia pada 2023 bertambah 1,1%, atau sekitar 410 juta ton, sehingga totalnya mencapai 37,4 miliar ton, dengan batu bara yang masih dipakai untuk kelistrikan dan kegiatan ekonomi di banyak negara sebagai pendorong utamanya. Di sisi lain, emisi negara maju justru turun sekitar 4,5% meskipun perekonomiannya terus tumbuh. Perubahan ini dikaitkan dengan semakin luasnya pemakaian energi bersih, menyusutnya penggunaan batu bara, dan membaiknya efisiensi energi. Perbedaan arah tersebut memberi petunjuk adanya pemisahan (*decoupling*) antara pertumbuhan ekonomi dan emisi di negara berpendapatan tinggi.

Perbedaan antarkawasan terlihat jelas dalam data jangka panjang. Dari 1990 hingga 2024, emisi CO_2 Asia meroket dari kira-kira 6 miliar ton hingga melampaui 23 miliar ton, searah dengan ekspansi industri, urbanisasi, dan kebutuhan energi yang sebagian besar masih dipenuhi bahan bakar fosil. Eropa

menempuh jalur yang berlawanan, yakni turun dari lebih dari 7 miliar ton menjadi sekitar 4 miliar ton, sedangkan Amerika Utara cenderung mendatar dan sedikit melandai pada tahun-tahun terakhir. Lintasan yang tidak sama ini menandakan bahwa perluasan kegiatan ekonomi tidak selalu menghasilkan tekanan lingkungan yang setara di semua kawasan. Untuk menjelaskan keterkaitan tersebut, banyak peneliti merujuk pada *Environmental Kuznets Curve* (EKC). Gagasannya, kerusakan lingkungan mula-mula membesar ketika pendapatan naik, mencapai puncak di suatu titik balik (*turning point*), lalu surut seiring pendapatan yang terus meningkat, sehingga grafiknya menyerupai huruf U yang terbalik (Grossman & Krueger, 1995). Penyusutan itu lazim dikaitkan dengan perubahan struktur ekonomi, kemunculan teknologi yang lebih bersih, efisiensi energi yang membaik, dan meningkatnya kepedulian terhadap mutu lingkungan.

Selain pendapatan, kajian tentang emisi juga perlu memperhatikan cara energi digunakan dan seberapa jauh suatu negara terhubung dengan pasar dunia. Energi menjadi masukan bagi hampir semua kegiatan produksi, sehingga perubahan jumlah dan jenis energi yang dipakai langsung terasa pada jumlah karbon yang dilepaskan. Perdagangan internasional bekerja lewat jalur yang lebih beragam: ia dapat memperbesar produksi, menggeser jenis barang yang dihasilkan, sekaligus membuka pintu bagi masuknya teknologi yang lebih efisien. Karena arah pengaruhnya tidak dapat ditebak begitu saja, *energy use* dan *trade openness* layak dimasukkan ke dalam model EKC sebagai variabel kontrol agar hubungan antara pendapatan dan emisi tidak dibaca secara sepihak. Studi ini mengambil 26 negara anggota OECD berpendapatan tinggi di Eropa sebagai objek. Kelompok ini layak dicermati karena secara teori memiliki kekuatan ekonomi, teknologi, dan kebijakan untuk beralih ke ekonomi rendah karbon, namun di antara mereka masih terdapat perbedaan yang jelas. Rata-rata GDP per kapita 2000–2024 sangat bervariasi: Luksemburg melampaui US$100.000, diikuti Swiss, Norwegia, dan Irlandia, sementara Latvia, Polandia, Hungaria, dan Lituania berada jauh di bawahnya (World Bank, 2025).

Ketimpangan serupa tampak pada emisi. Pada periode yang sama, Luksemburg memiliki rata-rata emisi paling tinggi dengan selisih yang mencolok dari negara lain; Estonia dan Ceko menyusul, sedangkan Latvia, Lituania, dan Swedia termasuk yang terendah. Sebab negara-negara itu berasal dari kelompok pendapatan yang sama, perbedaan tersebut menunjukkan bahwa besarnya pendapatan belum cukup untuk menerangkan beban lingkungan. Struktur ekonomi, kebiasaan memakai energi, tingkat teknologi, dan kebijakan lingkungan ikut menentukan. Selain pendapatan, dua faktor yang paling sering dikaitkan dengan emisi ialah *energy use* dan *trade openness*. Destek Sinha (2020) menuliskan bahwa bauran energi di negara OECD masih lebih banyak berasal dari sumber tak terbarukan, sehingga *energy use* berpeluang menjadi penentu emisi yang kuat.

Temuan empiris tentang EKC di negara OECD pun beragam. Muratoğlu et al. (2024) mendapati EKC berlaku pada perekonomian secara keseluruhan di 38 negara OECD. Sementara itu, Vo et al. (2022) dengan pendekatan CS-ARDL gagal menegaskannya untuk emisi CO_2. Erdogan et al. (2020) memperoleh dukungan EKC dari estimator FMOLS dan DOLS, tetapi tidak dari *Augmented Mean Group*. Ketidakselarasan ini menandakan bahwa kesimpulan dipengaruhi oleh pilihan sampel, periode, ukuran lingkungan, dan teknik estimasi. Di samping itu, banyak studi menggunakan sampel yang sangat beragam, misalnya seluruh anggota OECD atau ratusan negara dengan tingkat pendapatan berlainan (Wang et al., 2024), atau berfokus pada Asia dan Indonesia Marselina & Prasetyo, (2023) serta penelitian yang dilakukan oleh (Wahyudi et al., 2024).

Akibatnya, kajian-kajian itu kurang terfokus pada negara maju Eropa yang kondisi ekonominya relatif sebanding. Dari uraian tersebut tampak tiga kekosongan. Pertama, hasil uji EKC belum searah. Kedua, penelitian yang menyorot negara OECD berpendapatan tinggi di Eropa dengan sampel yang cukup seragam masih sedikit. Ketiga, belum banyak kajian yang menguji EKC sekaligus mengontrol *energy use* dan *trade openness* pada kelompok ini dengan cakupan waktu hingga periode terbaru. Atas dasar itu, tujuan penelitian ini ialah (1) menguji apakah EKC berlaku pada 26 negara OECD *High Income* Eropa pada 2000–2024 dan (2) menilai pengaruh *energy use* dan *trade openness* terhadap emisi CO_2 per kapita dalam model EKC tersebut, memakai *Fully Modified Ordinary Least Squares* (FMOLS) yang cocok untuk hubungan jangka panjang antarvariabel terkointegrasi (Phillips & Hansen, 1990).

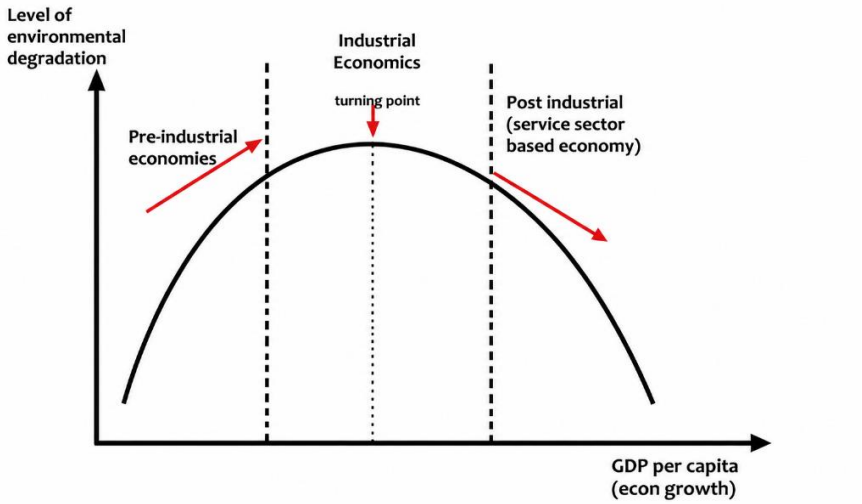
Penelitian ini diharapkan memberi manfaat dari dua sisi. Dari sisi akademik, hasilnya menambah bukti empiris tentang bentuk hubungan pendapatan dan emisi pada kelompok negara maju yang kondisinya relatif sebanding, sehingga perbandingan antarstudi menjadi lebih mudah dilakukan. Dari sisi praktis, temuan mengenai peran energi dan perdagangan dapat menjadi bahan pertimbangan bagi pengambil kebijakan yang ingin menurunkan emisi tanpa mengorbankan pertumbuhan ekonomi. Untuk memudahkan pembaca, artikel ini disusun sebagai berikut. Bagian kedua membahas landasan teori, penelitian terdahulu, dan hipotesis. Bagian ketiga menjelaskan data, spesifikasi model, dan prosedur analisis. Bagian keempat menyajikan hasil estimasi beserta pembahasannya, sedangkan bagian kelima memuat kesimpulan, keterbatasan, dan saran untuk penelitian berikutnya.

2. Tinjauan pustaka dan pengembangan hipotesis

2.1 Environmental Kuznets Curve

Akar gagasan EKC terletak pada temuan Kuznets (1955) tentang ketimpangan pendapatan, yang melebar pada fase awal pembangunan lalu menyempit setelah ekonomi mencapai kematangan tertentu. Grossman & Krueger (1995), memindahkan pola serupa ke persoalan lingkungan dengan menunjukkan bahwa mutu lingkungan dapat lebih dulu memburuk sebelum membaik saat pendapatan per kapita naik. Mereka menguraikan perubahan ini lewat tiga jalur efek skala (*scale effect*), efek komposisi (*composition effect*), dan efek teknik (*technique effect*). Efek skala muncul ketika aktivitas ekonomi yang membesar menaikkan produksi dan konsumsi energi sehingga tekanan terhadap lingkungan bertambah. Efek komposisi terjadi saat struktur ekonomi bergeser dari sektor yang boros sumber daya ke sektor yang lebih hemat. Efek teknik berkaitan dengan penggunaan teknologi bersih, efisiensi energi, dan aturan yang lebih ketat sejalan dengan naiknya pendapatan.

Kurva EKC biasa digambarkan dalam tiga tahap (Gambar 1). Pada tahap praindustri, kegiatan bertumpu pada sektor primer dan pengambilan sumber daya alam, sehingga degradasi naik mengikuti aktivitas. Pada tahap industri, produksi dan pendapatan melesat, tetapi pembakaran energi fosil mendorong emisi sampai puncaknya di titik balik. Setelah titik itu, ekonomi pascaindustri yang digerakkan jasa, teknologi rendah karbon, dan kebijakan lingkungan yang lebih baik membuat degradasi berkurang.



Gambar 1. Kurva Environmental Kuznets
Sumber: Diadaptasi dari Grossman dan Krueger (1995)

Namun, EKC bukanlah kaidah yang berlaku di mana-mana. Stern (2004) menekankan bahwa bukti EKC mudah goyah akibat masalah ekonometrika, seperti data yang tidak stasioner dan variabel penting yang terlewat, sehingga pengujiannya harus memperhatikan karakter deret waktu. Hasil yang berbeda di sejumlah wilayah menguatkan kesimpulan bahwa keberlakuan EKC sangat bergantung pada konteks. Pembacaan titik balik juga perlu dilakukan dengan hati-hati. Titik balik pada EKC bukanlah ambang otomatis yang menjamin penurunan emisi setelah suatu negara melewatinya, melainkan ringkasan statistik dari hubungan rata-rata pada sampel tertentu. Penurunan emisi pada tingkat pendapatan tinggi

tidak datang dengan sendirinya; ia bergantung pada pilihan kebijakan, investasi teknologi, dan perubahan bauran energi yang benar-benar terjadi. Oleh sebab itu, pengujian EKC lebih bermakna bila disertai variabel yang mewakili saluran-saluran tersebut, seperti *energy use* dan *trade openness*, sehingga bentuk kurva tidak ditafsirkan terlepas dari faktor penyebabnya.

2.2 Penelitian terdahulu dan celah penelitian

Beberapa studi pada negara OECD maupun sampel lintas negara mendukung EKC. Muratoğlu et al. (2024) memakai PNARDL pada 38 negara OECD tahun 1990–2022 dan menyimpulkan bahwa EKC berlaku untuk ekonomi total serta semua sektor kecuali industri, dengan titik balik ekonomi total sekitar US$29.250 per kapita. Almulhim et al. (2025) menerapkan CS-ARDL dan NARDL pada negara OECD 2007–2022 dan menemukan kurva U terbalik; perdagangan hijau, mutu institusi, dan investasi riset dan pengembangan menurunkan emisi, sedangkan rente sumber daya alam menaikkannya. Fakher & Inglesi-Lotz (2022), yang membandingkan OECD dan OPEC pada 2000–2019 dengan CUP-FM dan CUP-BC, juga memperoleh pola U terbalik untuk OECD, di mana energi terbarukan memperbaiki kualitas lingkungan dan energi tak terbarukan memburukkannya. Dogan dan Seker (2016) menyimpulkan EKC sahih pada negara OECD melalui model panel yang mempertimbangkan heterogenitas dan ketergantungan antarsampel; *trade openness* dan perkembangan keuangan menurunkan emisi, sedangkan konsumsi energi menaikkannya. Dalam cakupan global, Wang et al. (2024) menganalisis 147 negara pada 1995–2018, menemukan EKC berlaku, dan memperlihatkan bahwa dampak proteksionisme perdagangan bergantung pada kelompok pendapatan.

Sejumlah studi tidak mendukung pola itu. Vo et al. (2022), dengan CS-ARDL pada negara OECD, tidak menemukan bukti EKC, menyimpulkan bahwa *trade openness* menaikkan emisi CO_2, dan menunjukkan kausalitas dua arah antara emisi dengan pendapatan serta porsi energi. Destek dan Sinha (2020) mengkaji 24 negara OECD pada 1980–2014 dengan metode panel generasi kedua dan memperoleh bentuk U, bukan U terbalik, pada jejak ekologis. Tang et al. (2025) tidak menemukan kurva U terbalik di Afrika Barat berdasarkan data tiga dekade dengan *Spatial Durbin Model*, FMOLS, dan CCR; investasi asing langsung selaras dengan hipotesis *pollution halo*, sedangkan perdagangan menambah emisi. Erdogan et al., (2020) pada 25 negara OECD 1990–2014 mendapati dukungan EKC dari FMOLS dan DOLS namun tidak dari *Augmented Mean Group*, dan perdagangan tidak berpengaruh nyata.

Kelompok studi lainnya menyoroti pemisahan pertumbuhan dari emisi dan peran energi. Magazzino et al., (2024) menggabungkan dekomposisi LMDI dengan indeks Tapio untuk negara OECD 1990–2019: efek aktivitas dan penduduk mendorong emisi hingga 2004, kemudian efek aktivitas mulai menahannya, dengan rezim *decoupling* yang bervariasi. Freire-González et al. (2024) mendapati pada 164 negara bahwa hubungan GDP per kapita dan emisi tetap positif tetapi melemah, dan 49 negara sudah mencapai *decoupling*, termasuk sebagian besar negara Eropa. Sharif et al. (2025) memanfaatkan *structural equation modelling* pada 115 negara selama 1992–2018 dan melaporkan bahwa konsumsi energi menaikkan CO_2 di semua kelompok pendapatan, serta bahwa interaksi *trade openness* dengan pertumbuhan merugikan kualitas lingkungan.

Kajian-kajian tersebut mengungkap dua hal. Pertama, dukungan atas EKC bergantung pada teknik dan indikator: FMOLS dan DOLS menyokong EKC pada Erdogan et al. (2020) tetapi *Augmented Mean Group* tidak. Jejak ekologis menghasilkan pola U pada Destek dan Sinha (2020), sementara CO_2 dan indeks kualitas lingkungan memberi pola U terbalik pada sebagian studi lain. Kedua, hampir semua studi menggunakan cakupan negara yang luas atau beragam, sehingga peran *energy use* dan *trade openness* pada negara maju Eropa yang relatif seragam belum terpetakan secara khusus. Kekosongan inilah yang hendak diisi artikel ini.

2.3 Pengembangan hipotesis

Bertolak dari teori EKC Grossman & Krueger, (1995), pendapatan diduga menaikkan emisi pada tahap awal, lalu menurunkannya begitu titik balik terlewati. Dugaan ini sejalan dengan bukti bahwa negara maju mampu memisahkan pertumbuhan dari emisi Freire-González et al., (2024) dan dengan temuan EKC pada kelompok berpendapatan tinggi Zulaikha et al., (2025). Maka hipotesis berikut diajukan.

H1: *Environmental Kuznets Curve* berlaku pada negara OECD *High Income* Eropa tahun 2000–2024, ditandai oleh koefisien GDP per kapita yang positif dan koefisien kuadratnya yang negatif, keduanya signifikan.
H2: *Energy use* berpengaruh positif terhadap emisi CO_2 pada negara OECD *High Income* Eropa tahun 2000–2024.
H3: *Trade openness* berpengaruh signifikan terhadap emisi CO_2 pada negara OECD *High Income* Eropa tahun 2000–2024.

3. Metodologi penelitian

3.1 Rancangan penelitian, data, dan sampel

Penelitian ini memakai pendekatan kuantitatif dengan data sekunder berbentuk panel, yaitu gabungan dimensi antarnegara (*cross section*) dan runtun waktu (*time series*). Data panel dipilih karena mampu menangkap perbedaan antarunit sekaligus perubahan dari waktu ke waktu, serta menyediakan jumlah pengamatan yang lebih banyak daripada data *cross section* atau *time series* yang berdiri sendiri (Baltagi, 2021). Pendekatan serupa dipakai pada kajian emisi di kawasan Asia dan ASEAN, misalnya oleh Gunarto et al. (2025) untuk sembilan negara ASEAN dan Zulaikha et al. (2025) untuk 17 negara Asia, meskipun cakupan wilayah dan tingkat pendapatan sampelnya berbeda dengan penelitian ini.

Sampel terdiri atas 26 negara anggota OECD berpendapatan tinggi di Eropa: Austria, Belgia, Ceko, Denmark, Estonia, Finlandia, Jerman, Yunani, Hungaria, Islandia, Irlandia, Italia, Latvia, Lituania, Luksemburg, Belanda, Norwegia, Polandia, Portugal, Slovakia, Slovenia, Spanyol, Swedia, Swiss, dan Britania Raya. Rentang 2000–2024 menghasilkan 650 pengamatan negara-tahun pada panel seimbang. Data emisi CO_2 bersumber dari *Our World in Data* (2025), sedangkan GDP per kapita, *energy use*, dan *trade openness* berasal dari *World Development Indicators* (WDI) terbitan World Bank (2025). Kedua sumber ini juga dipakai oleh Wahyudi et al. (2024) dan (Zulaikha et al., 2025), sehingga data penelitian ini dapat dibandingkan dengan studi-studi tersebut. Seluruh variabel ditransformasi ke logaritma agar koefisien *energy use* dan *trade openness* dapat dibaca sebagai elastisitas jangka panjang. Data diolah dengan eviews 13. Rincian variabel tersaji pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel, pengukuran, dan sumber data

Variabel (simbol)	Pengukuran	Sumber data
Emisi CO_2 ($logCO_2$)	Logaritma emisi CO_2 per kapita	Our World in Data
GDP per kapita (logGDP)	Logaritma l GDP per kapita atas dasar harga konstan (US$)	WDI, World Bank
GDP per kapita kuadrat ($logGDP^2$)	Kuadrat dari logGDP; dipakai untuk menguji pola U terbalik	Dihitung dari logGDP
Energy use (logEU)	Logaritma *energy use* (kg setara minyak per kapita)	WDI, World Bank
Trade openness (logTRD)	Logaritma total ekspor dan impor sebagai persentase GDP	WDI, World Bank

Sumber: Our World in Data dan World Bank diolah penulis

Panel berbentuk seimbang, artinya setiap negara diamati pada seluruh tahun sehingga tidak ada pengamatan yang hilang. Emisi dinyatakan per kapita agar negara dengan jumlah penduduk berbeda dapat dibandingkan secara wajar. Rentang 2000–2024 dipilih supaya periode pengamatan cukup panjang untuk menangkap hubungan jangka panjang sekaligus mencerminkan kondisi terbaru. Penggunaan satu kelompok negara berpendapatan tinggi membuat sampel relatif seragam, sehingga perbedaan hasil lebih mudah dikaitkan dengan variabel yang diuji dan bukan dengan jurang tingkat pembangunan yang lebar. Berbeda dengan Marselina & Prasetyo (2023) yang membandingkan kelompok negara berpendapatan tinggi, menengah, dan rendah dalam satu kajian, penelitian ini sengaja memusatkan perhatian pada satu kelompok pendapatan. Transformasi logaritma juga membantu

meredam pengaruh nilai ekstrem, misalnya Luksemburg yang pendapatan dan emisinya jauh di atas negara lain.

3.2 Spesifikasi model

Model yang diestimasi menguji EKC dengan memasukkan GDP per kapita dan GDP per kapita kuadrat, ditambah *energy use* dan *trade openness* sebagai variabel control.

$$logCO_{2it} = \alpha_i + \beta_1 logGDP_{it} + \beta_2 logGDP_{it}^2 + \beta_3 logEU_{it} + \beta_4 logTRD_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

dengan i sebagai negara, t sebagai tahun, α_i konstanta khusus tiap negara, β koefisien regresi, dan ε_{it} galat. EKC dianggap berlaku jika β_1 positif dan β_2 negatif serta keduanya signifikan. Jika β_2 tidak negatif dan signifikan, pola U terbalik tidak terdukung. Apabila EKC terbukti, titik balik pendapatan dihitung dengan persamaan berikut.

$$logGDP^2 = -\beta_1 / (2\beta_2), \text{ sehingga } GDP^2 = \exp(logGDP^2) \quad (3)$$

Spesifikasi di atas mengandung tiga hal yang perlu dicatat. Pertama, konstanta khusus tiap negara (α_{*i*}) menyerap perbedaan karakteristik antarnegara yang tidak berubah selama periode pengamatan, seperti letak geografis dan warisan struktur industri. Kedua, karena seluruh variabel berbentuk logaritma, koefisien logEU dan logTRD dibaca sebagai elastisitas, sedangkan pengaruh GDP per kapita harus dibaca bersama koefisien kuadratnya karena efek marjinalnya berubah menurut tingkat pendapatan. Ketiga, tanda yang diharapkan ialah β_1 positif, β_2 negatif, dan β_3 positif, sedangkan β_4 dapat bertanda positif maupun negatif sesuai rumusan hipotesis pada bagian 2.3.

3.3 Prosedur analisis

Analisis dilakukan dalam empat langkah. Langkah pertama adalah statistik deskriptif sebagai gambaran awal data. Langkah kedua adalah uji akar unit panel ADF-Fisher. Uji ini penting karena data tidak stasioner dapat memunculkan regresi lancung (*spurious regression*) (Gujarati & Porter, 2009). Hipotesis nolnya menyatakan adanya akar unit dan ditolak bila probabilitas di bawah 0,05. Pengujian dilakukan pada level dan diferensi pertama untuk menentukan orde integrasi. Tahap stasioneritas dengan uji ADF juga ditempuh oleh Wahyudi et al. (2024) pada data Indonesia 1990–2021 dan oleh Lismiyah et al. (2024) pada data 1980–2021, sehingga urutan prosedur ini lazim dalam kajian emisi.

Langkah ketiga adalah uji kointegrasi residual Kao, (1999) dengan asumsi kointegrasi homogen antarunit. Uji ini bertumpu pada pendekatan Engle Gran & ger (1987), kombinasi linear dari variabel yang tidak stasioner pada level bisa saja stasioner, dan itulah penanda keseimbangan jangka panjang. Hipotesis nol menyatakan tidak ada kointegrasi dan ditolak bila probabilitas di bawah 0,05. Lismiyah et al. (2024) memakai uji Johansen dan Wahyudi et al. (2024) memakai uji Engle-Granger pada deret waktu tunggal, sedangkan uji Kao dipilih di sini karena datanya berbentuk panel.

Langkah keempat adalah mengestimasi model EKC dengan FMOLS. Phillips & Hansen (1990) merancang metode ini sebagai perbaikan *ordinary least squares* (OLS) dengan mengoreksi endogenitas regresor dan korelasi serial galat pada regresi kointegrasi. Kao & Chiang (2000) menunjukkan bahwa pendekatan ini pada data panel mengurangi bias estimasi regresi kointegrasi, sehingga FMOLS sesuai untuk menaksir elastisitas jangka panjang pada panel variabel I(1) yang terkointegrasi. Pengaruh parsial setiap variabel diuji dengan uji t pada $\alpha = 5\%$, dengan H_0: $\beta = 0$ dan H_1: $\beta \neq 0$; H_0 ditolak bila probabilitas kurang dari 0,05.

Perlu dicatat bahwa ADF-Fisher, Kao, dan FMOLS tergolong pendekatan panel generasi pertama yang tidak secara eksplisit memperhitungkan ketergantungan antarnegara (*cross-sectional dependence*, CSD). Pada negara-negara Eropa yang terintegrasi erat, guncangan di satu negara dapat menjalar ke negara lain. FMOLS tetap dipilih sebagai baseline karena tujuan utama penelitian ini adalah memperoleh estimasi elastisitas jangka panjang pada panel terkointegrasi dengan prosedur yang

transparan dan mudah dibandingkan dengan studi terdahulu, misalnya Erdogan et al. (2020). Estimator yang kokoh terhadap CSD, seperti CS-ARDL, kami posisikan sebagai agenda penelitian lanjutan.

Seluruh pengujian memakai taraf signifikansi 5% dengan EViews 13. Urutan langkah di atas dipatuhi karena hasil tiap tahap menentukan kelayakan tahap berikutnya. Jika variabel ternyata stasioner pada level, estimasi dapat memakai cara yang lebih sederhana, dan bila kointegrasi tidak terbukti, hasil FMOLS tidak dapat ditafsirkan sebagai hubungan jangka panjang.

4. Hasil dan pembahasan

4.1 Statistik deskriptif

Tabel 2 merangkum 650 pengamatan dari 26 negara pada 2000–2024. LNCO_2 rata-rata 2,0059 (sekitar 7,4 ton CO_2 per kapita sebagai rata-rata geometrik) dengan simpangan baku 0,3917. Nilai terendah 1,0953 dan tertinggi 3,2561 setara kira-kira 3,0 hingga 25,9 ton per kapita, sehingga rentang antarnegara cukup lebar. logGDP rata-rata 10,3475, setara GDP per kapita sekitar US$31.200, dengan kisaran sekitar US$6.300 sampai US$112.400. logEU rata-rata 8,2075 atau sekitar 3.670 kg setara minyak per kapita, dan logTRD rata-rata 4,6296 atau sekitar 102,5% dari GDP. Simpangan baku semua variabel jauh lebih kecil daripada rata-ratanya, sehingga sebaran data tidak terlalu lebar. Uji Jarque–Bera menunjukkan hanya logCO_2 yang berdistribusi normal pada taraf 5%, namun hal itu bukan prasyarat utama bagi FMOLS yang bertumpu pada sifat asimtotik.

Tabel 2. Statistik deskriptif

Statistik	logCO_2	logGDP	logGDP^2	logEU	logTRD
Rata-rata	2,0059	10,3475	107,5019	8,2075	4,6296
Median	2,0480	10,5092	110,4436	8,1510	4,6061
Maksimum	3,2561	11,6300	135,2573	9,8099	6,0215
Minimum	1,0953	8,7541	76,6336	7,3893	3,8098
Deviasi standar	0,3917	0,6570	13,5262	0,4381	0,4473
Observasi	650	650	650	650	650

Sumber: Data diolah

Gambaran ini memperlihatkan bahwa sampel cukup beragam walaupun seluruh negara berpendapatan tinggi. Meskipun simpangan baku relatif kecil dibandingkan rata-ratanya, selisih antara nilai minimum dan maksimum pada logGDP (8,7541 dan 11,6300) serta logCO_2 (1,0953 dan 3,2561) menunjukkan keragaman yang berarti dalam hal pendapatan maupun emisi, sehingga pengujian EKC pada kelompok ini bukan hal yang sepele. Variasi yang memadai pada setiap variabel juga menguntungkan estimasi, sebab koefisien lebih mudah dibedakan dari nol bila data menyebar pada rentang yang cukup lebar. Nilai rata-rata logGDP^2 sebesar 107,5019 dengan deviasi standar 13,5262 sejalan dengan logGDP karena variabel ini diturunkan langsung darinya.

4.2 Uji stasioneritas

Pada Tabel 3, seluruh variabel (logCO_2, logGDP, logGDP^2, logEU, dan logTRD) pada level memiliki probabilitas di atas 0,05, sehingga hipotesis nol akar unit tidak dapat ditolak dan variabel belum stasioner. Setelah diferensiasi pertama, probabilitas semuanya 0,0000 sehingga hipotesis nol ditolak. Dengan demikian semua variabel stasioner pada diferensi pertama atau terintegrasi orde satu, I(1), dan

prasyarat uji kointegrasi terpenuhi. Pola I(1) yang sama dilaporkan pula oleh Wahyudi et al. (2024) dan Lismiyah et al. (2024) untuk emisi, pendapatan, dan konsumsi energi di Indonesia.
Tabel 3. Hasil uji akar unit ADF-Fisher

	Level		First difference		
Variabel	**Statistik**	**Prob.**	**Statistik**	**Prob.**	**Keputusan**
$logCO_2$	13,0544	1,0000	245,2880	0,0000	Stasioner, I(1)
logGDP	41,6393	0,8475	247,0620	0,0000	Stasioner, I(1)
$logGDP^2$	40,3151	0,8807	249,4010	0,0000	Stasioner, I(1)
logEU	24,0455	0,9997	241,2820	0,0000	Stasioner, I(1)
logTRD	47,2238	0,6619	355,0900	0,0000	Stasioner, I(1)

Sumber: Data diolah

Temuan ini penting karena regresi pada variabel yang tidak stasioner berisiko menghasilkan hubungan yang tampak kuat padahal hanya kebetulan, sehingga penggunaan data pada level secara langsung tidak dibenarkan. Fakta bahwa kelima variabel menjadi stasioner pada selisih pertama menunjukkan bahwa seluruhnya memiliki orde integrasi yang sama, yaitu satu, sehingga hubungan jangka panjang di antara mereka layak diperiksa melalui uji kointegrasi pada tahap berikutnya.

4.3 Uji kointegrasi Kao

Tabel 4 menyajikan hasil uji Kao untuk model EKC dengan variabel $logCO_2$, logGDP, $logGDP^2$, logEU, dan logTRD. Statistik *t* ADF bernilai −3,9933 dengan probabilitas 0,0000, di bawah 0,05, sehingga hipotesis nol ketiadaan kointegrasi ditolak. Dengan kata lain, variabel-variabel itu memiliki hubungan keseimbangan jangka panjang dan estimasi FMOLS dapat dilanjutkan.

Tabel 4. Hasil uji kointegrasi residual Kao

Model	**Statistik *t* ADF**	**Prob.**	**Varians residual**	**Varians HAC**
Model EKC	−3,9933	0,0000	0,001655	0,001601

Sumber: Data diolah

Makna hasil ini adalah bahwa meskipun tiap variabel dapat menjauh dari lintasan jangka panjangnya, kombinasi linear di antara mereka kembali ke keseimbangan. Koefisien yang diestimasi karenanya mencerminkan hubungan jangka panjang, bukan sekadar korelasi sesaat. Temuan kointegrasi ini searah dengan Lismiyah et al. (2024) serta Wahyudi et al. (2024) yang juga menemukan hubungan jangka panjang antara emisi dan variabel ekonomi-energi pada data Indonesia. Perlu diingat bahwa uji Kao mengasumsikan kointegrasi yang sama pada semua negara, sehingga kesimpulannya berlaku untuk kelompok secara keseluruhan dan tidak berarti setiap negara memiliki hubungan yang identik.

4.4 Hasil estimasi FMOLS

Hasil estimasi FMOLS model EKC ada pada Tabel 5. R^2 sebesar 0,9565 dan R^2 terkoreksi 0,9544. GDP per kapita berpengaruh positif signifikan, kuadratnya negatif signifikan, *energy use* positif signifikan, dan *trade openness* negatif signifikan.

Tabel 5. Hasil estimasi FMOLS model EKC (variabel terikat: logCO_2)

Variabel	Koefisien	Std. Error	*t*	Prob.
logGDP	1,2866	0,5539	2,3228	0,0205
logGDP²	−0,0709	0,0281	−2,5247	0,0118
logEU	1,1958	0,0521	22,9408	0,0000
logTRD	−0,3034	0,0542	−5,5979	0,0000
R^2	0,9565			
R^2 disesuaikan	0,9544			

Sumber: Data diolah

Besaran koefisien memperlihatkan perbedaan peran antarvariabel. Koefisien logEU jauh lebih besar daripada koefisien logTRD dan memiliki statistik *t* yang paling tinggi, sehingga *energy use* tampak sebagai faktor yang paling kuat dalam menjelaskan variasi emisi. Sementara itu, galat baku koefisien logGDP dan logGDP² relatif besar terhadap nilai koefisiennya, yang wajar karena keduanya saling berkaitan erat sebagai bentuk linear dan kuadrat dari variabel yang sama, namun keduanya tetap signifikan pada taraf 5%. Nilai R^2 yang tinggi juga dipengaruhi oleh konstanta khusus tiap negara dan besarnya perbedaan antarnegara dalam data panel, sehingga tidak boleh dibaca sebagai bukti tunggal bahwa model bebas dari masalah.

4.5 Pembahasan

4.5.1 Berlakunya Environmental Kuznets Curve (H1)

Koefisien logGDP positif (1,2866; $p = 0{,}0205$) dan koefisien logGDP² negatif (−0,0709; $p = 0{,}0118$), keduanya signifikan pada 5%. Kombinasi tanda ini memenuhi kriteria pola U terbalik, sehingga H1 diterima: emisi CO_2 per kapita naik pada tingkat pendapatan rendah, mencapai puncak, lalu turun ketika pendapatan terus meningkat. Menurut Persamaan (3), titik balik terletak pada logGDP 9,0747, setara GDP per kapita sekitar US$8.700 (harga konstan). Angka ini masih berada dalam rentang sampel (minimum sekitar US$6.300) tetapi jauh di bawah rata-rata geometrik sampel sekitar US$31.200, sehingga sebagian besar negara dalam sampel kemungkinan sudah berada di sisi kurva yang menurun. Gambaran ini selaras dengan temuan bahwa banyak negara Eropa telah mencapai *decoupling* (Freire-González et al., 2024) dan dengan turunnya emisi negara maju yang telah dibahas pada bagian pendahuluan.

Titik balik tersebut lebih rendah daripada sekitar US$29.250 yang dilaporkan Muratoğlu et al. (2024) untuk 38 negara OECD perbedaan itu bisa berasal dari sampel, periode, dan spesifikasi model, sehingga angka titik balik lebih tepat dibaca sebagai perkiraan indikatif, bukan batas yang kaku.

Hasil ini sejalan dengan pola U terbalik pada Muratoğlu et al. (2024). Hasil FMOLS pada Erdogan et al. (2020) pun searah dengan temuan ini. Sebaliknya, Vo et al. (2022) tidak mengonfirmasi EKC. Pola U pada jejak ekologis diperoleh oleh Destek & Sinha (2020). Perbedaan tersebut mungkin bersumber dari ukuran lingkungan (emisi CO_2 per kapita dibandingkan jejak ekologis), susunan sampel, dan estimator; Erdogan et al. (2020) sendiri menunjukkan bahwa FMOLS dan *Augmented Mean Group* dapat berujung pada kesimpulan yang berbeda. Karena estimator di sini tidak memperhitungkan ketergantungan antarnegara, hasil EKC ini sebaiknya dibaca dengan hati-hati.

4.5.2 Pengaruh energy use (H2)

Koefisien logEU positif dan signifikan (1,1958; $p = 0{,}0000$), sehingga H2 diterima. Kenaikan *energy use* per kapita 1% berasosiasi dengan kenaikan emisi CO_2 per kapita sekitar 1,2% dalam jangka panjang, dengan variabel lain tetap. *Energy use* merupakan penentu terkuat dalam model, terlihat dari besar koefisien dan statistik *t* (22,94). Hasil ini konsisten dengan Dogan dan Seker (2016) yang menemukan bahwa konsumsi energi menambah emisi. Temuan serupa dilaporkan oleh Sharif et al. (2025). Elastisitas di atas satu menunjukkan emisi bereaksi cukup kuat terhadap perubahan *energy use*, selaras dengan bauran energi OECD yang masih didominasi sumber tak terbarukan (Destek & Sinha, 2020), walau penelitian ini tidak memisahkan jenis energi.

4.5.3 Pengaruh trade openness (H3)
Koefisien logTRD negatif dan signifikan (−0,3034; p = 0,0000), sehingga H3 diterima. Peningkatan *trade openness* 1% berasosiasi dengan penurunan emisi CO_2 per kapita sekitar 0,30%. Dalam kerangka Grossman & Krueger (1995), hasil ini mengisyaratkan bahwa efek teknik lebih kuat daripada efek skala pada kelompok negara yang diteliti: integrasi perdagangan dapat membuka akses ke teknologi yang lebih efisien dan standar lingkungan yang lebih ketat, meskipun mekanisme tersebut tidak diuji langsung di sini. Temuan ini searah dengan Dogan & Seker (2016) untuk negara OECD. Sebaliknya, Vo et al. (2022) mendapati bahwa *trade openness* menaikkan emisi pada sampel OECD. Erdogan et al. (2020) tidak menemukan hubungan yang signifikan. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa pengaruh perdagangan peka terhadap susunan sampel, periode, dan spesifikasi model (Wang et al., 2024).

4.5.4 Kecocokan model dan implikasi
Nilai R^2 di atas 0,95 menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan sebagian besar variasi emisi CO_2. Dari sisi kebijakan, hasilnya menunjukkan bahwa pendapatan tinggi saja tidak menjamin emisi rendah. Karena elastisitas *energy use* melebihi satu, penurunan emisi tetap membutuhkan efisiensi energi yang lebih baik dan peralihan ke sumber rendah karbon, sedangkan *trade openness* dapat diarahkan menjadi saluran alih teknologi bersih. Implikasi ini sejalan dengan pandangan bahwa kebijakan energi, pertumbuhan, dan emisi sebaiknya dirancang secara terpadu (Vo et al., 2022).

Beberapa catatan perlu diperhatikan dalam membaca seluruh hasil di atas. Pertama, koefisien yang dihasilkan menggambarkan keterkaitan jangka panjang secara rata-rata dan tidak otomatis menunjukkan hubungan sebab-akibat, karena penelitian ini tidak menguji arah kausalitas. Kedua, titik balik sekitar US$8.700 dihitung dari koefisien yang masing-masing memiliki galat baku cukup besar, sehingga ketidakpastiannya tidak kecil. Ketiga, *trade openness* diukur dengan rasio ekspor dan impor terhadap GDP, yang belum membedakan jenis barang yang diperdagangkan maupun kemungkinan perpindahan emisi ke negara lain. Dengan catatan tersebut, temuan penelitian ini paling tepat dipahami sebagai bukti yang konsisten dengan EKC pada kelompok negara yang diteliti, bukan sebagai kepastian bahwa pertumbuhan akan selalu menurunkan emisi.

5. Kesimpulan
Penelitian ini menguji *Environmental Kuznets Curve* pada 26 negara OECD *High Income* Eropa tahun 2000–2024 melalui FMOLS. Semua variabel stasioner pada diferensi pertama dan terkointegrasi menurut uji Kao, sehingga hubungan jangka panjang dapat diestimasi. Pertama, hipotesis EKC terdukung: koefisien GDP per kapita positif (1,2866) dan kuadratnya negatif (−0,0709) pada taraf 5%, dengan titik balik indikatif sekitar US$8.700. Kedua, *energy use* berpengaruh positif signifikan dengan elastisitas sekitar 1,2. Ketiga, *trade openness* berpengaruh negatif signifikan dengan elastisitas sekitar −0,3. Dengan demikian, di negara maju Eropa pertumbuhan ekonomi tidak lagi identik dengan naiknya emisi, tetapi *energy use* tetap menjadi penentu terpenting. Bagi pengambil kebijakan, efisiensi energi dan peralihan ke energi rendah karbon tetap perlu diprioritaskan, sementara kebijakan perdagangan dapat dimanfaatkan untuk mendorong alih teknologi bersih.

Secara lebih luas, hasil penelitian ini memberi pesan bahwa kemakmuran dan kualitas lingkungan dapat berjalan bersama bila didukung pilihan kebijakan yang tepat. Pemerintah negara-negara yang diteliti dapat mempertahankan arah penurunan emisi melalui perbaikan efisiensi energi, percepatan peralihan ke sumber rendah karbon, dan pemanfaatan *trade openness* untuk menarik teknologi bersih.

Pelajaran bagi negara berkembang, khususnya Indonesia. Indonesia saat ini masih berada pada fase ketika pendapatan dan emisi bergerak searah: GDP per kapita berpengaruh positif terhadap emisi (Wahyudi et al., 2024) dan konsumsi energi berkelindan erat dengan emisi (Lismiyah et al., 2024). Pada tingkat ASEAN, pertumbuhan industri bahkan memperkuat dampak pertumbuhan ekonomi terhadap emisi (Gunarto et al., 2025). Pengalaman Eropa menunjukkan bahwa penurunan emisi pada tingkat pendapatan tinggi tidak datang dengan sendirinya, melainkan lewat efisiensi energi, bauran energi yang lebih bersih, dan teknologi yang lebih efisien. Bagi negara yang sedang menuju status berpendapatan menengah atas, seperti yang dikaji Zulaikha et al., (2025), pelajaran praktisnya adalah menanamkan

efisiensi energi dan pembangunan industri rendah karbon sejak dini, sehingga titik balik dapat dicapai lebih cepat tanpa mengorbankan pertumbuhan. Meski demikian, hasil ini tidak boleh digeneralisasi begitu saja karena kondisi ekonomi dan kelembagaan kedua kelompok negara berbeda. Marselina & Prasetyo (2023) bahkan menunjukkan bahwa faktor pendorong emisi berbeda antara kelompok pendapatan tinggi, menengah, dan rendah.

Limitasi dan studi lanjutan

Penelitian ini memiliki beberapa batasan. Pertama, uji akar unit ADF-Fisher dan uji Kao termasuk generasi pertama yang tidak secara eksplisit mengakomodasi ketergantungan antarnegara. Kedua, kualitas lingkungan hanya diukur dengan emisi CO_2, dan *energy use* tidak dipilah menurut sumbernya sehingga peran energi terbarukan belum tampak. Ketiga, belum ada uji kekokohan dengan estimator lain. Penelitian selanjutnya dapat memakai *Dynamic OLS* (DOLS) sebagai pembanding FMOLS, serta estimator yang kokoh terhadap ketergantungan antarnegara seperti CS-ARDL atau *Augmented Mean Group*. Penambahan porsi energi terbarukan dan mutu institusi, serta perbandingan emisi berbasis produksi dan konsumsi untuk menelaah kemungkinan perpindahan emisi melalui perdagangan, juga layak dipertimbangkan.

Ucapan terima kasih

Penulis berterima kasih kepada dosen pembimbing atas bimbingan, saran, dan waktu selama penelitian ini disusun. Terima kasih juga ditujukan kepada Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Lampung yang menyediakan dukungan akademik.

Referensi

Almulhim, A. A., Qamruzzaman, M., & Aljughaiman, A. A. (2025). The influence of green trade openness, natural resources rent, institutional quality, and R&D investment on environmental sustainability in the OECD: Testing the EKC and LCC hypotheses. *Frontiers in Environmental Science, 13*, Article 1572439. https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1572439

Baltagi, B. H. (2021). *Econometric analysis of panel data* (6th ed.). Springer.

Destek, M. A., & Sinha, A. (2020). Renewable, non-renewable energy consumption, economic growth, trade openness and ecological footprint: Evidence from Organisation for Economic Co-operation and Development countries. *Journal of Cleaner Production, 242*, Article 118537.

Dogan, E., & Seker, F. (2016). An investigation on the determinants of carbon emissions for OECD countries: Empirical evidence from panel models robust to heterogeneity and cross-sectional dependence. *Environmental Science and Pollution Research, 23*(14), 14646–14655. https://doi.org/10.1007/s11356-016-6632-2

Engle, R. F., & Granger, C. W. J. (1987). Co-integration and error correction: Representation, estimation, and testing. *Econometrica, 55*(2), 251–276.

Erdogan, S., Okumus, I., & Guzel, A. E. (2020). Revisiting the environmental Kuznets curve hypothesis in OECD countries: The role of renewable, non-renewable energy, and oil prices. *Environmental Science and Pollution Research, 27*(19), 23655–23663. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08520-x

Fakher, H. A., & Inglesi-Lotz, R. (2022). Revisiting environmental Kuznets curve: An investigation of renewable and non-renewable energy consumption role. *Environmental Science and Pollution Research, 29*, 87583–87601.

Freire-González, J., Padilla Rosa, E., & Raymond, J. L. (2024). World economies' progress in decoupling from CO_2 emissions. *Scientific Reports, 14*. https://doi.org/10.1038/s41598-024-71101-2

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics, 110*(2), 353–377.

Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2009). *Basic econometrics* (5th ed.). McGraw-Hill.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, H. Lee, & J. Romero, Eds.). IPCC. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

International Energy Agency. (2024). *CO_2 emissions in 2023*. IEA. https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023

Gunarto, T., Hadiyati, S., Hudani, M. M., Ciptawaty, U., & Afif, F. Y. (2025). Growth, industrial structure, and carbon emissions in ASEAN: A panel data analysis. *Jurnal Riset Ilmu Ekonomi, 5*(3), 173–189. https://doi.org/10.23969/jrie.v5i3.342

Kao, C. (1999). Spurious regression and residual-based tests for cointegration in panel data. *Journal of Econometrics, 90*(1), 1–44.

Kao, C., & Chiang, M.-H. (2000). On the estimation and inference of a cointegrated regression in panel data. In B. H. Baltagi, T. B. Fomby, & R. C. Hill (Eds.), *Nonstationary panels, panel cointegration, and dynamic panels* (Advances in Econometrics, Vol. 15, pp. 179–222). Emerald Group Publishing.

Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *The American Economic Review, 45*(1), 1–28.

Lismiyah, E., Marselina, M., Taher, A. R., Gunarto, T., & Aida, N. (2024). The causality between energy consumption and carbon emission in Indonesia. *Jurnal Riset Ilmu Ekonomi, 4*(1), 27–38. https://doi.org/10.23969/jrie.v4i1.83

Magazzino, C., Pakrooh, P., & Abedin, M. Z. (2024). A decomposition and decoupling analysis for carbon dioxide emissions: Evidence from OECD countries. *Environment, Development and Sustainability, 26*, 28539–28566. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03824-7

Marselina, & Prasetyo, T. J. (2023). Does the "Environmental Kuznets Curve" phenomenon happening in high, medium, and low income countries? *International Journal of Energy Economics and Policy, 13*(1), 544–551. https://doi.org/10.32479/ijeep.13507

Muratoğlu, Y., Songur, M., Uğurlu, E., & Şanlı, D. (2024). Testing the environmental Kuznets curve hypothesis at the sector level: Evidence from PNARDL for OECD countries. *Frontiers in Energy Research, 12*, Article 1452906. https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1452906

Our World in Data. (2025). *CO_2 and greenhouse gas emissions* [Data set]. https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions

Phillips, P. C. B., & Hansen, B. E. (1990). Statistical inference in instrumental variables regression with I(1) processes. *The Review of Economic Studies, 57*(1), 99–125.

Sharif, T., Uddin, M. M. M., & Alexiou, C. (2025). Testing the moderating role of trade openness on the environmental Kuznets curve hypothesis: A novel approach. *Annals of Operations Research, 345*(2). https://doi.org/10.1007/s10479-021-04501-6

Solow, R. M. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics, 70*(1), 65–94.

Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the environmental Kuznets curve. *World Development, 32*(8), 1419–1439.

Tang, D., Boamah, V., Ding, Q., & Bai, J. (2025). Spatial dependencies and long-run dynamics of the Environmental Kuznets Curve in West Africa: An analysis of growth vs. emissions. *Frontiers in Environmental Science, 13*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1621251

Teralsyah, M. A., & Taher, A. R. Y. (2022). Analisis faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan ekonomi daerah tertinggal di Indonesia. Jurnal Multidisiplin Madani (MUDIMA), 2(11), 4062–4076. https://doi.org/10.55927/mudima.v2i11.1929

Vo, D. H., Ho, C. M., Le, Q. T. T., & Vo, A. T. (2022). Revisiting the energy-growth-environment nexus in the OECD countries: An application of the CS-ARDL approach. *Energy, Sustainability and Society, 12*, Article 47. https://doi.org/10.1186/s13705-022-00375-z

Wahyudi, H., Gunarto, T., Ciptawaty, U., Aida, N., Yunita, R., & Putri, R. M. (2024). The influence of determinants on CO_2 emission in Indonesia for a decade. *International Journal of Energy Economics and Policy, 14*(1), 61–65. https://doi.org/10.32479/ijeep.15132

Wang, Q., Wang, X., Li, R., & Jiang, X. (2024). Reinvestigating the environmental Kuznets curve (EKC) of carbon emissions and ecological footprint in 147 countries: A matter of trade protectionism. *Humanities and Social Sciences Communications, 11*, Article 160. https://doi.org/10.1057/s41599-024-02639-9

World Bank. (2025). *World Development Indicators* [Data set]. https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators

Zulaikha, A. A., Emalia, Z., Putri, R. M., Murwiati, A., & Ananta, P. (2025). Determinasi emisi karbon negara high income dan upper middle income di Asia: Pendekatan EKC. *Indonesian Journal of Economics, Management, and Accounting, 2*(7), 2108–2118.