



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 3871-3879

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Pengaruh PDB, Investasi Asing Langsung, dan Keterbukaan Perdagangan terhadap Emisi CO₂ di Lima Negara dengan PDB Terbesar Dunia

Feryanto Nababan, Armin Rahmansyah Nasution

Program Studi Ilmu Ekonomi, Fakultas Ekonomi, Universitas Negeri Medan

ferinababan7@gmail.com, armin@unimed.ac.id

Abstrak

Peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂) akibat aktivitas ekonomi global menjadi perhatian serius dalam agenda pembangunan berkelanjutan internasional. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh Produk Domestik Bruto (PDB) per kapita, investasi asing langsung (Foreign Direct Investment/FDI), dan keterbukaan perdagangan terhadap emisi CO₂ per kapita di lima negara dengan PDB terbesar dunia, yaitu Amerika Serikat, China, Jepang, Jerman, dan India, pada periode 2010–2024. Data sekunder bersumber dari World Bank/World Development Indicators diolah menggunakan regresi data panel. Pemilihan Fixed Effect Model (FEM) sebagai model terpilih didasarkan pada hasil Uji Chow ($F = 107,79$; prob. 0,0000) dan Uji Hausman ($\chi^2 = 62,52$; prob. 0,0000). Uji asumsi klasik menunjukkan model bebas dari multikolinearitas dan heteroskedastisitas. Hasil estimasi FEM menunjukkan bahwa PDB per kapita (koef. $-0,000256$; prob. 0,0000), FDI (koef. $-0,390$; prob. 0,001), dan keterbukaan perdagangan (koef. $-0,047$; prob. 0,008) masing-masing berpengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi CO₂ per kapita. Secara simultan, ketiga variabel berpengaruh signifikan ($F = 482,67$; prob. 0,000) dengan nilai Adjusted R² sebesar 0,978. Temuan ini mendukung Environmental Kuznets Curve (EKC), Pollution Halo Hypothesis, serta dominasi technique effect dan composition effect dalam Trade and Environment Theory. Implikasi kebijakan menekankan pentingnya sinergi antara pertumbuhan ekonomi, arus investasi ramah lingkungan, dan liberalisasi perdagangan berbasis teknologi hijau dalam mendukung transisi energi dan dekarbonisasi global.

Kata kunci: Emisi CO₂, FDI, Fixed Effect Model, Keterbukaan Perdagangan, PDB per Kapita

1. Latar Belakang

Perubahan iklim global menjadi salah satu isu strategis yang memperoleh perhatian besar dalam agenda pembangunan internasional karena peningkatan konsentrasi emisi karbon dioksida (CO₂) terbukti mempercepat pemanasan global, kerusakan ekosistem, serta meningkatkan risiko krisis lingkungan lintas negara. Laporan Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) menunjukkan bahwa aktivitas ekonomi modern berbasis industri, konsumsi energi fosil, perdagangan internasional, dan ekspansi investasi global merupakan faktor utama peningkatan emisi karbon dunia [1]. Dalam konteks ekonomi global, negara-negara dengan Produk Domestik Bruto (PDB) terbesar memiliki kontribusi dominan terhadap total emisi dunia karena tingginya aktivitas produksi, konsumsi energi, industrialisasi, serta integrasi perdagangan internasional. Amerika Serikat, China, Jepang, Jerman, dan India merupakan lima negara dengan kapasitas ekonomi terbesar dunia sekaligus termasuk negara dengan tingkat emisi karbon tertinggi secara global [2]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi modern masih menghadapi dilema antara ekspansi ekonomi dan keberlanjutan lingkungan. Fenomena ini menjadi penting untuk dikaji karena keberhasilan pembangunan ekonomi tidak lagi hanya diukur dari pertumbuhan output, tetapi juga dari kemampuan negara dalam menekan degradasi lingkungan dan mencapai pembangunan berkelanjutan.

Hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan kerusakan lingkungan dijelaskan melalui teori Environmental Kuznets Curve (EKC) yang dikembangkan oleh Grossman dan Krueger (1991) [3]. Teori ini menjelaskan bahwa pada tahap awal pembangunan ekonomi, peningkatan pendapatan per kapita cenderung meningkatkan emisi dan degradasi lingkungan akibat dominasi industrialisasi dan penggunaan energi fosil. Namun, ketika suatu negara mencapai tingkat pendapatan tertentu, peningkatan kesejahteraan akan mendorong penggunaan teknologi yang lebih bersih, peningkatan regulasi lingkungan, serta perubahan struktur ekonomi menuju sektor jasa sehingga emisi mulai menurun. Dengan demikian, hubungan antara PDB per kapita dan emisi CO₂ membentuk pola kurva U terbalik. Dalam konteks emisi karbon, teori EKC menjelaskan bahwa negara dengan tingkat pendapatan tinggi

Pengaruh PDB, Investasi Asing Langsung, dan Keterbukaan Perdagangan terhadap Emisi CO₂ di Lima Negara dengan PDB Terbesar Dunia

memiliki kemampuan lebih besar dalam mengembangkan energi bersih, meningkatkan efisiensi energi, dan memperkuat regulasi lingkungan. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan emisi karbon masih menjadi perdebatan karena tidak semua negara berhasil mencapai titik balik EKC [4], [5], [6]. Penelitian Mahmood (2020) juga menunjukkan bahwa hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan emisi karbon masih sangat dipengaruhi oleh keterbukaan perdagangan, struktur produksi, dan konsumsi energi di masing-masing negara [4]. Sementara itu, Jin dan Kim (2020) menemukan bahwa tidak semua negara maju berhasil mencapai turning point EKC sehingga peningkatan pendapatan belum tentu secara otomatis menurunkan emisi karbon [5]. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa pertumbuhan ekonomi masih menjadi faktor penting yang menentukan kualitas lingkungan global.

Selain pertumbuhan ekonomi, investasi asing langsung atau Foreign Direct Investment (FDI) juga menjadi variabel penting dalam menjelaskan dinamika emisi karbon dunia. Dalam literatur ekonomi lingkungan terdapat dua pendekatan utama yang menjelaskan hubungan FDI dengan kualitas lingkungan, yaitu Pollution Haven Hypothesis dan Pollution Halo Hypothesis. Pollution Haven Hypothesis menjelaskan bahwa perusahaan multinasional cenderung memindahkan industri padat polusi ke negara dengan regulasi lingkungan yang lebih lemah sehingga FDI meningkatkan emisi karbon. Hipotesis ini banyak digunakan untuk menjelaskan peningkatan emisi karbon pada negara berkembang yang menerima investasi industri manufaktur dan energi intensif karbon. Sebaliknya, Pollution Halo Hypothesis menyatakan bahwa investasi asing langsung dapat membawa teknologi modern, efisiensi energi, dan praktik produksi berkelanjutan yang justru memperbaiki kualitas lingkungan. Beberapa penelitian juga telah menunjukkan bahwa pengaruh FDI terhadap emisi karbon sangat dipengaruhi oleh kapasitas teknologi, kualitas institusi, dan regulasi lingkungan masing-masing negara [7], [8], [9]. Penelitian Solarin et al. (2020) menunjukkan bahwa pengaruh FDI terhadap emisi karbon bersifat heterogen antarnegara dan dipengaruhi oleh kapasitas teknologi serta kualitas institusi lingkungan [7]. Penelitian Ochoa-Moreno et al. (2021) juga menunjukkan bahwa pada beberapa negara berkembang, FDI cenderung meningkatkan emisi karbon karena dominasi investasi di sektor manufaktur dan energi intensif karbon. Namun pada negara dengan regulasi lingkungan kuat, FDI justru berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi energi dan pengurangan emisi [8].

Keterbukaan perdagangan juga menjadi faktor yang berpengaruh terhadap emisi karbon melalui peningkatan aktivitas produksi dan integrasi ekonomi global. Trade and Environment Theory menjelaskan bahwa perdagangan internasional dapat memengaruhi kualitas lingkungan melalui tiga mekanisme utama, yaitu scale effect, composition effect, dan technique effect. Scale effect terjadi ketika perdagangan meningkatkan skala produksi sehingga konsumsi energi dan emisi meningkat. Composition effect muncul ketika perdagangan mengubah struktur produksi suatu negara menuju sektor yang lebih atau kurang intensif karbon. Technique effect terjadi ketika keterbukaan perdagangan mempercepat transfer teknologi bersih sehingga mampu menekan emisi karbon. Dalam perspektif Comparative Advantage Theory, negara cenderung mengeksport produk berdasarkan keunggulan komparatifnya, termasuk pada sektor industri berbasis energi dan sumber daya alam yang berpotensi meningkatkan emisi karbon. Berbagai studi terdahulu telah Nguyen et al. (2020), Ahmed dan Le (2021), serta Mahmood (2020) menunjukkan bahwa dampak perdagangan terhadap emisi karbon sangat dipengaruhi oleh struktur ekonomi dan kualitas teknologi suatu negara [10], [11], [4]. Penelitian Nguyen et al. (2020) menemukan bahwa keterbukaan perdagangan memiliki pengaruh positif terhadap emisi karbon di negara berkembang karena dominasi efek skala [10]. Sebaliknya, penelitian Ahmed dan Le (2021) menunjukkan bahwa perdagangan dapat menurunkan emisi karbon apabila disertai peningkatan teknologi dan transformasi digital [11].

Secara simultan, hubungan antara pertumbuhan ekonomi, investasi asing langsung, dan keterbukaan perdagangan terhadap emisi karbon dapat dijelaskan melalui Ecological Modernization Theory. Teori ini menjelaskan bahwa modernisasi ekonomi, inovasi teknologi, perdagangan internasional, dan investasi global dapat menjadi sarana untuk memperbaiki kualitas lingkungan apabila didukung kebijakan lingkungan yang efektif. Teori ini menekankan bahwa pertumbuhan ekonomi tidak selalu bertentangan dengan keberlanjutan lingkungan karena kemajuan teknologi mampu meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi karbon. Dengan kata lain, pembangunan ekonomi modern tidak selalu menghasilkan degradasi lingkungan apabila negara mampu mengintegrasikan pertumbuhan ekonomi dengan inovasi teknologi dan kebijakan berkelanjutan. Dalam konteks penelitian ini, teori tersebut digunakan untuk menjelaskan pengaruh simultan PDB per kapita, investasi asing langsung, dan keterbukaan perdagangan terhadap emisi CO₂ di lima negara dengan PDB terbesar dunia. Dalam konteks negara-negara dengan PDB terbesar dunia, pengujian teori ini menjadi penting karena negara-negara tersebut memiliki tingkat industrialisasi tinggi, aktivitas perdagangan internasional yang masif, dan arus investasi global yang besar sehingga berpotensi memberikan dampak signifikan terhadap emisi karbon dunia.

Fenomena empiris menunjukkan bahwa selama periode 2010–2024, lima negara dengan PDB terbesar dunia mengalami dinamika ekonomi dan lingkungan yang kompleks. China mengalami peningkatan industrialisasi dan ekspansi manufaktur yang mendorong peningkatan emisi karbon secara signifikan, meskipun dalam beberapa tahun terakhir mulai meningkatkan investasi energi terbarukan. Amerika Serikat masih menjadi salah satu negara dengan tingkat emisi karbon per kapita tertinggi akibat tingginya konsumsi energi dan aktivitas industri. India menunjukkan peningkatan emisi yang sangat cepat seiring pertumbuhan ekonomi dan urbanisasi. Jepang dan Jerman relatif lebih berhasil mengendalikan emisi melalui efisiensi energi dan transformasi industri berbasis teknologi hijau, meskipun tetap menghadapi tekanan emisi akibat aktivitas perdagangan internasional dan konsumsi energi industri. Perbedaan karakteristik ekonomi, struktur industri, dan kebijakan lingkungan antarnegara tersebut menjadikan penelitian mengenai determinan emisi karbon menjadi relevan untuk dianalisis menggunakan pendekatan data panel.

Penelitian mengenai hubungan PDB, FDI, keterbukaan perdagangan, dan emisi karbon sebenarnya telah banyak dilakukan, namun masih menunjukkan hasil yang inkonsisten. Salah satu penelitian menemukan bahwa FDI berpengaruh positif terhadap emisi CO₂ di negara-negara Annex Kyoto [9]. Sebaliknya, penelitian lain menunjukkan bahwa perdagangan dan transformasi teknologi mampu menurunkan emisi karbon pada beberapa negara ASEAN [11]. Terdapat juga penelitian yang menunjukkan bahwa validitas Environmental Kuznets Curve tidak berlaku secara universal di seluruh negara maju [5]. Sementara itu, penelitian lainnya juga menemukan bahwa perdagangan internasional dan pertumbuhan ekonomi masih menjadi faktor utama peningkatan emisi pada negara emerging economies [6]. Inkonsistensi hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa hubungan antarvariabel masih sangat dipengaruhi oleh karakteristik negara, periode penelitian, serta model analisis yang digunakan.

Penelitian ini memiliki urgensi akademik dan empiris yang kuat karena mengkaji lima negara dengan PDB terbesar dunia yang secara kolektif memiliki kontribusi dominan terhadap ekonomi dan emisi global. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya fokus pada negara berkembang atau kawasan tertentu, penelitian ini menggunakan kombinasi negara maju dan berkembang sehingga mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai hubungan pertumbuhan ekonomi, investasi asing langsung, dan keterbukaan perdagangan terhadap emisi karbon. Selain itu, penelitian ini menggunakan periode terbaru 2010–2024 sehingga mampu menangkap dinamika ekonomi global pasca krisis keuangan, perang dagang internasional, transisi energi, serta agenda pembangunan berkelanjutan dunia.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh PDB per kapita, investasi asing langsung, dan keterbukaan perdagangan terhadap emisi CO₂ di lima negara dengan PDB terbesar dunia periode 2010–2024. Secara khusus, penelitian ini menguji pengaruh parsial masing-masing variabel independen terhadap emisi karbon serta pengaruh simultan seluruh variabel dalam kerangka Ecological Modernization Theory. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan literatur ekonomi lingkungan internasional sekaligus menjadi bahan pertimbangan bagi pemerintah dalam merumuskan kebijakan pembangunan ekonomi yang berorientasi pada keberlanjutan lingkungan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksplanatori dengan metode analisis regresi data panel. Objek penelitian adalah lima negara dengan PDB nominal terbesar dunia, yaitu Amerika Serikat, China, Jepang, Jerman, dan India. Periode penelitian mencakup tahun 2010 hingga 2024 ($T = 15$), sehingga total observasi dalam panel seimbang berjumlah 75 data ($N = 5, T = 15$).

Data yang digunakan merupakan data sekunder yang bersumber dari World Development Indicators (WDI) yang dipublikasikan oleh World Bank, serta Our World in Data (OWID). Variabel dependen dalam penelitian ini adalah emisi CO₂ per kapita (Y) yang diukur dalam satuan metric tons per capita. Variabel independen meliputi: (1) PDB per kapita (X_1) yang diukur dalam current US dollar; (2) FDI net inflow sebagai persentase terhadap PDB (X_2); dan (3) keterbukaan perdagangan atau trade openness yang diukur sebagai rasio total perdagangan terhadap PDB dalam persen (X_3).

Model persamaan regresi data panel dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

$$CO_{2it} = \alpha + \beta_1 GDP_{it} + \beta_2 FDI_{it} + \beta_3 TRADE_{it} + \varepsilon_{it} \quad \dots (1)$$

Keterangan: CO_{2it} = emisi CO₂ per kapita negara i tahun t; GDP_{it} = PDB per kapita; FDI_{it} = FDI net inflow (% GDP); $TRADE_{it}$ = keterbukaan perdagangan (% GDP); α = konstanta; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = koefisien regresi; ϵ_{it} = error term.

Penentuan model terbaik dalam analisis data panel dilakukan melalui serangkaian uji spesifikasi. Uji Chow (Redundant Fixed Effects Test) digunakan untuk memilih antara Common Effect Model (CEM) dan Fixed Effect Model (FEM), dengan kriteria penolakan H₀ apabila nilai probabilitas F-statistik < 0,05. Uji Hausman selanjutnya digunakan untuk memilih antara FEM dan Random Effect Model (REM); apabila nilai Chi-square statistik signifikan (prob. < 0,05), maka FEM dipilih karena efek individu berkorelasi dengan variabel independen.

Pengujian asumsi klasik dilakukan melalui dua tahapan. Pertama, Uji Multikolinearitas menggunakan matriks korelasi antarvariabel independen, dengan ambang batas nilai korelasi tidak melebihi 0,80. Kedua, Uji Heteroskedastisitas menggunakan regresi auxiliary nilai absolut residual (ABSRES) terhadap seluruh variabel independen; apabila tidak ada variabel independen yang signifikan pada $\alpha = 5\%$, maka disimpulkan tidak terdapat masalah heteroskedastisitas.

Pengujian statistik inferensial mencakup Uji t untuk signifikansi parsial, Uji F untuk signifikansi simultan, dan koefisien determinasi (R² dan Adjusted R²) untuk mengukur kemampuan penjelas model. Seluruh pengujian dilakukan pada tingkat signifikansi 5 persen menggunakan perangkat lunak EViews.

3. Hasil dan Diskusi

Pemilihan Model Regresi Data Panel

Langkah pertama dalam analisis data panel adalah menentukan model estimasi yang paling sesuai. Uji Chow dilakukan untuk membandingkan Common Effect Model (CEM) dengan Fixed Effect Model (FEM). Hasil yang ditampilkan pada Tabel 1 menunjukkan nilai Cross-section F sebesar 107,787 dengan probabilitas 0,0000 dan nilai Cross-section Chi-square sebesar 150,465 dengan probabilitas 0,0000. Kedua nilai probabilitas tersebut berada jauh di bawah $\alpha = 5\%$, sehingga H₀ (CEM lebih baik) ditolak dan Fixed Effect Model (FEM) dipilih.

Tabel 1. Hasil Uji Chow (Redundant Fixed Effects)

Effects Test	Statistik	d.f.	Prob.
Cross-section F	107,787	(4,67)	0,0000
Cross-section Chi-square	150,465	4	0,0000

Sumber: Output EViews, diolah penulis (2026)

Selanjutnya, Uji Hausman dilakukan untuk mengkonfirmasi pilihan antara FEM dan Random Effect Model (REM). Tabel 2 menunjukkan nilai Chi-Sq. Statistic sebesar 62,521 dengan derajat bebas 3 dan probabilitas 0,0000, sehingga H₀ (REM lebih efisien) ditolak secara meyakinkan. Hasil ini mengindikasikan bahwa efek individu masing-masing negara berkorelasi dengan variabel independen dalam model, sehingga penggunaan FEM menghasilkan estimator yang konsisten (consistent). Berdasarkan kedua uji tersebut, Fixed Effect Model ditetapkan sebagai model estimasi terpilih.

Tabel 2. Hasil Uji Hausman

Test Summary	Chi-Sq. Stat.	d.f.	Prob.
Cross-section random	62,521	3	0,0000

Sumber: Output EViews, diolah penulis (2026)

Uji Asumsi Klasik

Uji Multikolinearitas dilakukan menggunakan matriks korelasi antarvariabel independen. Tabel 3 memperlihatkan bahwa nilai korelasi antara PDB dan FDI sebesar -0,0550, antara PDB dan TO sebesar -0,0334, serta antara FDI dan TO sebesar 0,3898. Seluruh nilai korelasi berada jauh di bawah ambang batas 0,80, sehingga disimpulkan

tidak terdapat masalah multikolinearitas yang berarti dalam model. Estimasi koefisien regresi FEM dengan demikian bebas dari bias akibat kolinearitas antarvariabel penjelas.

Tabel 3. Matriks Korelasi Antarvariabel Independen

Variabel	PDB_	FDI	TO
PDB_	1,0000	-0,0550	-0,0334
FDI	-0,0550	1,0000	0,3898
TO	-0,0334	0,3898	1,0000

Sumber: Output EViews, diolah penulis (2026)

Uji Heteroskedastisitas dilakukan melalui regresi auxiliary nilai absolut residual (ABSRES) terhadap seluruh variabel independen. Tabel 4 menunjukkan bahwa probabilitas variabel PDB sebesar 0,4572, FDI sebesar 0,7911, dan TO sebesar 0,1326, seluruhnya berada di atas $\alpha = 5\%$. Dengan demikian H_0 (tidak ada heteroskedastisitas) gagal ditolak, yang berarti varians residual bersifat homoskedastis sehingga estimator FEM memenuhi sifat BLUE (Best Linear Unbiased Estimator).

Tabel 4. Hasil Uji Heteroskedastisitas (Dep. Var.: ABSRES)

Variabel	Koefisien	Std. Error	t-Statistik	Prob.
C	1,7834	0,8352	2,1353	0,0364
PDB_P	-1.58E-05	2.12E-05	-0,7477	0,4572
FDI	0,0185	0,0695	0,2659	0,7911
TO	-0,0162	0,0106	-1,5224	0,1326

Sumber: Output EViews, diolah penulis (2026)

Hasil Estimasi Fixed Effect Model

Berdasarkan estimasi FEM menggunakan data panel seimbang ($N=5$, $T=15$, total obs=75), diperoleh persamaan regresi sebagai berikut:

$$CO_{2it} = 18,9459 - 0,000256 PDB_{it} - 0,3899 FDI_{it} - 0,0471 TO_{it} + \varepsilon_{it} \quad \dots (2)$$

Tabel 5 menyajikan hasil estimasi secara lengkap. Nilai konstanta sebesar 18,9459 bermakna bahwa apabila seluruh variabel independen bernilai nol, rata-rata emisi CO_2 per kapita kelima negara berada pada tingkat 18,95 metrik ton. Seluruh variabel independen (PDB, FDI, dan TO) terbukti berpengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi CO_2 per kapita pada tingkat signifikansi 1%. Model secara keseluruhan sangat signifikan ($F = 482,67$; prob. 0,000) dengan Adjusted R^2 sebesar 0,978, yang berarti 97,85% variasi emisi CO_2 antarnegara dan antarwaktu mampu dijelaskan oleh ketiga variabel independen beserta efek tetap masing-masing negara.

Tabel 5. Hasil Estimasi Fixed Effect Model (Dep. Var.: CO_2)

Variabel	Koefisien	Std. Error	t-Statistik	Prob.
C	18,9459	1,3586	13,9451	0,0000***
PDB_	-0,000256	3.45E-05	-7,4415	0,0000***
FDI	-0,3899	0,1130	-3,4510	0,0010***
TO	-0,0471	0,0173	-2,7207	0,0083***

R-squared: 0,9806 | Adjusted R²: 0,9785 | F-stat: 482,67 (prob. 0,000) | DW: 0,906
Cross-section fixed effects (dummy variables). $N=5$, $T=15$, $Obs=75$.
*** signifikan pada $\alpha = 1\%$

Sumber: Output EViews, diolah penulis (2026)

Pengaruh PDB per Kapita terhadap Emisi CO₂

Hasil estimasi FEM menunjukkan bahwa PDB per kapita memiliki koefisien sebesar -0,000256 dengan t-statistik -7,4415 dan probabilitas 0,0000, sehingga H1 diterima. Setiap peningkatan PDB per kapita sebesar satu dolar AS, emisi CO₂ per kapita rata-rata menurun sebesar 0,000256 metrik ton, ceteris paribus. Arah pengaruh negatif ini secara konsisten mendukung bagian sisi kanan kurva Environmental Kuznets Curve (EKC) dari Grossman dan Krueger [3], di mana kelima negara yang diteliti dengan PDB per kapita yang sudah sangat tinggi berada pada fase penurunan emisi seiring pertumbuhan pendapatan.

Temuan ini didukung oleh sejumlah penelitian bereputasi internasional. Pertama, Koira et al. (2025) dalam studinya terhadap negara-negara G7 menggunakan data panel 1960–2022 yang dipublikasikan di jurnal *Economies* mengkonfirmasi keberadaan hubungan EKC antara PDB per kapita dan emisi CO₂, dengan titik balik yang diestimasi pada level PDB per kapita sekitar US\$47.844 dalam harga 2023. Artinya, Amerika Serikat, Jerman, dan Jepang yang seluruhnya telah melampaui ambang tersebut secara konsisten berada pada fase penurunan emisi [12]. Kedua, penelitian oleh Freire-González et al. (2024) yang menggunakan metode *segmented-sample regressions* pada 164 negara dan dipublikasikan di *Scientific Reports* menemukan bahwa asosiasi positif antara PDB per kapita dan emisi CO₂ semakin melemah dari waktu ke waktu, dan sejumlah negara berpenghasilan tinggi telah menunjukkan asosiasi terbalik (negatif) dalam beberapa dekade terakhir [13]. Ketiga, studi komparatif oleh Wani et al. (2025) yang diterbitkan di *Journal of Applied Economics* terhadap sepuluh ekonomi terbesar dunia termasuk AS, China, Jepang, Jerman, dan India menemukan bahwa hipotesis EKC berlaku pada seluruh sampel kecuali India, di mana investasi, perdagangan, dan pertumbuhan ekonomi secara simultan membentuk dinamika emisi yang kompleks [14].

Secara mekanistik, penurunan emisi seiring peningkatan PDB per kapita pada kelima negara tersebut dapat dijelaskan melalui beberapa jalur transmisi. Pertama, kapasitas fiskal yang lebih besar mendorong investasi penelitian dan pengembangan (R&D) teknologi energi bersih yang masif, khususnya di Amerika Serikat dan Jerman yang telah memiliki ekosistem inovasi energi hijau yang mapan. Kedua, peningkatan pendapatan mendorong transformasi struktural ekonomi dari sektor manufaktur intensif karbon menuju sektor jasa, ekonomi digital, dan industri berbasis pengetahuan yang memiliki intensitas emisi jauh lebih rendah. Ketiga, tekanan publik yang lebih kuat di negara-negara berpenghasilan tinggi mendorong penguatan regulasi lingkungan dan implementasi kebijakan dekarbonisasi, seperti *European Green Deal* di Jerman maupun *Inflation Reduction Act* di Amerika Serikat.

Pengaruh FDI terhadap Emisi CO₂

Variabel FDI net inflow memiliki koefisien sebesar -0,3899 dengan t-statistik -3,4510 dan probabilitas 0,0010, sehingga H2 diterima. Setiap peningkatan FDI net inflow sebesar satu persen terhadap PDB, emisi CO₂ per kapita rata-rata menurun sebesar 0,3899 metrik ton, ceteris paribus. Arah pengaruh negatif ini mendukung *Pollution Halo Hypothesis* dan secara tegas menolak *Pollution Haven Hypothesis* dalam konteks lima negara dengan PDB terbesar dunia.

Temuan ini didukung oleh penelitian-penelitian terkini yang bereputasi. Liu dan Guo (2023) dalam studi *spatial econometrics* yang dipublikasikan di *Frontiers in Environmental Science* menemukan bahwa FDI di kota-kota China secara keseluruhan menurunkan polusi melalui *technology effect* yang lebih dominan dibandingkan *scale* dan *structural effect*, mengkonfirmasi *Pollution Halo Hypothesis* [15]. Abdelgany dan Gad (2022) dalam penelitian panel 30 dan 42 negara berkembang yang diterbitkan di *International Journal of Economy, Energy and Environment* menemukan bahwa FDI menurunkan emisi CO₂ di kedua sampel penelitian, sejalan dengan hipotesis *pollution halo* [16]. Duan dan Xuemei (2021) dalam studi *revisional* yang dipublikasikan di *Energy Economics* menemukan bahwa FDI yang masuk ke sektor jasa mendukung *halo effect*, sementara hanya FDI di sektor manufaktur pada negara berpenghasilan rendah dan menengah yang cenderung mendukung *haven effect* [17].

Mekanisme negatif FDI terhadap emisi CO₂ pada kelima negara tersebut dapat dipahami melalui tiga jalur utama. Pertama, perusahaan multinasional yang beroperasi di negara-negara ini umumnya tunduk pada standar ESG (*Environmental, Social, Governance*) yang ketat dan tekanan investor institusional global, sehingga membawa praktik produksi rendah karbon. Kedua, dominasi FDI ke sektor teknologi tinggi, keuangan, farmasi, dan jasa pada kelima negara yang semuanya merupakan sektor dengan intensitas emisi rendah lebih dominan dibandingkan FDI di sektor manufaktur intensif karbon. Ketiga, meningkatnya arus FDI ke sektor energi terbarukan di Amerika

Serikat, China, dan India selama periode 2010–2024 secara langsung berkontribusi terhadap penurunan emisi karbon melalui substitusi energi fosil.

Pengaruh Keterbukaan Perdagangan terhadap Emisi CO₂

Variabel keterbukaan perdagangan memiliki koefisien sebesar -0,0471 dengan t-statistik -2,7207 dan probabilitas 0,0083, sehingga H3 diterima. Setiap peningkatan rasio perdagangan terhadap PDB sebesar satu persen, emisi CO₂ per kapita rata-rata menurun sebesar 0,0471 metrik ton, ceteris paribus. Meskipun besaran koefisiennya relatif lebih kecil dibandingkan PDB dan FDI, pengaruhnya tetap signifikan secara statistik dan relevan secara ekonomi.

Temuan ini dapat dijelaskan dalam kerangka Trade and Environment Theory melalui dominasi technique effect dan composition effect. Technique effect terjadi ketika integrasi perdagangan mempercepat difusi teknologi produksi bersih antarnegara melalui rantai pasokan global (global value chains). Composition effect muncul ketika perdagangan internasional mendorong restrukturisasi ekonomi menuju sektor jasa dan manufaktur bernilai tambah tinggi yang lebih hemat energi. Pada kelima negara yang dikaji, perdagangan selama periode 2010–2024 lebih didominasi oleh produk teknologi, semikonduktor, kendaraan listrik, jasa keuangan, dan farmasi yang semuanya tergolong rendah emisi.

Secara empiris, hasil ini konsisten dengan sejumlah penelitian bereputasi. Nguyen et al. (2020) dalam studi pada negara-negara berpenghasilan menengah-atas dan tinggi menemukan bahwa keterbukaan perdagangan berpengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi, dengan technique effect yang mendominasi scale effect [10]. Li dan Haneklaus (2022) dalam penelitian terhadap negara-negara G7 yang dipublikasikan di Energy Reports menemukan bahwa perdagangan internasional yang disertai peningkatan konsumsi energi bersih berkontribusi nyata dalam menurunkan emisi CO₂ [18]. Penelitian oleh Wani et al. (2025) pada sepuluh ekonomi terbesar dunia juga menunjukkan bahwa trade openness dan emisi CO₂ memiliki hubungan kausalitas dua arah, namun dalam jangka panjang keterbukaan perdagangan pada negara-negara maju cenderung menurunkan emisi melalui percepatan adopsi standar lingkungan global [14].

Secara kontekstual, China menjadi contoh menarik: meskipun masih memiliki sektor manufaktur intensif karbon, tekanan dari pasar ekspor negara-negara maju yang mensyaratkan standar lingkungan (seperti Carbon Border Adjustment Mechanism Uni Eropa) mendorong adopsi produksi bersih dalam rantai pasokan globalnya. Jerman dan Jepang, sebagai negara dengan keterbukaan perdagangan tinggi berbasis ekspor teknologi canggih dan manufaktur bernilai tambah tinggi, secara konsisten menunjukkan pola penurunan emisi yang selaras dengan peningkatan integrasi perdagangan internasional.

Pengaruh Simultan terhadap Emisi CO₂

Nilai F-statistik sebesar 482,67 dengan probabilitas 0,0000 menunjukkan bahwa PDB per kapita, FDI, dan keterbukaan perdagangan secara simultan berpengaruh signifikan terhadap emisi CO₂, sehingga H4 diterima. Nilai Adjusted R² sebesar 0,978 mengindikasikan bahwa 97,85% variasi emisi CO₂ antarnegara dan antarwaktu mampu dijelaskan oleh ketiga variabel beserta efek tetap masing-masing negara. Nilai F-statistik yang sangat tinggi mencerminkan kemampuan prediksi model yang sangat kuat.

Temuan pengaruh simultan ini mendukung Ecological Modernization Theory yang menjelaskan bahwa modernisasi ekonomi, kemajuan teknologi, integrasi perdagangan, dan arus investasi internasional dapat secara sinergis mendorong perbaikan kualitas lingkungan apabila didukung kebijakan lingkungan yang efektif. Dalam konteks penelitian ini, kombinasi peningkatan PDB per kapita (yang mendorong investasi teknologi hijau), arus FDI (yang membawa transfer teknologi ramah lingkungan), dan keterbukaan perdagangan (yang mempercepat difusi standar produksi bersih) secara bersama-sama terbukti berkontribusi terhadap penurunan emisi CO₂ di kelima negara.

Penelitian Koshta et al. (2020) yang diterbitkan di Indian Growth and Development Review menemukan bahwa perdagangan internasional, perkembangan keuangan, dan pertumbuhan ekonomi secara bersama-sama memberikan pengaruh signifikan terhadap emisi CO₂ pada negara-negara emerging economies [6]. Studi Wani et al. (2025) yang lebih relevan secara kontekstual juga menemukan bahwa pada sepuluh ekonomi terbesar dunia, variabel ekonomi makro seperti pertumbuhan ekonomi, FDI, dan perdagangan secara kolektif membentuk

dinamika emisi yang signifikan, dengan perbedaan arah pengaruh yang bergantung pada karakteristik struktural masing-masing negara [14].

Implikasi dari temuan simultan ini sangat penting bagi perumusan kebijakan ekonomi lingkungan internasional. Ketiga variabel tidak bekerja secara terisolasi, melainkan saling berinteraksi dan memperkuat dalam membentuk trajektori emisi karbon. Ketika suatu negara mampu mengelola pertumbuhan ekonomi, arus investasi asing, dan integrasi perdagangan secara sinergis dengan kebijakan lingkungan yang kuat, maka modernisasi ekonomi terbukti dapat berjalan beriringan dengan perbaikan kualitas lingkungan. Hal ini menjadi landasan penting bagi kelima negara tersebut untuk terus memperkuat komitmen multilateral dalam agenda dekarbonisasi global, khususnya melalui implementasi kebijakan net-zero emission 2050 dan percepatan transisi energi terbarukan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis pengaruh PDB per kapita, investasi asing langsung (FDI), dan keterbukaan perdagangan terhadap emisi CO₂ per kapita di lima negara dengan PDB terbesar dunia (Amerika Serikat, China, Jepang, Jerman, dan India) periode 2010–2024 menggunakan Fixed Effect Model. Berdasarkan hasil estimasi, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama. Pertama, PDB per kapita berpengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi CO₂ (koef. -0,000256; prob. 0,0000), mengkonfirmasi hipotesis EKC bahwa kelima negara telah berada pada sisi kanan kurva di mana peningkatan pendapatan beriringan dengan penurunan emisi melalui transformasi teknologi dan pergeseran struktural ekonomi. Kedua, FDI berpengaruh negatif dan signifikan (koef. -0,3899; prob. 0,001), mendukung Pollution Halo Hypothesis dan menolak Pollution Haven Hypothesis dalam konteks negara-negara dengan PDB terbesar yang memiliki regulasi lingkungan kuat dan kapasitas kelembagaan tinggi. Ketiga, keterbukaan perdagangan berpengaruh negatif dan signifikan (koef. -0,047; prob. 0,008), konsisten dengan dominasi technique effect dan composition effect dalam Trade and Environment Theory. Keempat, ketiga variabel secara simultan berpengaruh signifikan ($F = 482,67$; Adj. $R^2 = 0,978$), mendukung Ecological Modernization Theory bahwa modernisasi ekonomi dapat berjalan sinergis dengan perbaikan kualitas lingkungan. Temuan ini memiliki implikasi kebijakan yang penting. Pemerintah di kelima negara perlu memastikan bahwa kebijakan investasi asing diarahkan pada sektor teknologi hijau dan energi terbarukan. Kebijakan perdagangan internasional perlu didesain untuk mendorong percepatan transfer teknologi bersih melalui rantai pasokan global. Pertumbuhan ekonomi harus diiringi dengan penguatan regulasi lingkungan dan komitmen target dekarbonisasi yang ambisius. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengintegrasikan variabel konsumsi energi terbarukan, inovasi teknologi, dan kualitas institusi lingkungan guna memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai determinan emisi karbon pada ekonomi-ekonomi terbesar dunia.

Referensi

- [1] Kaya, Y. (1990). *Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc_wgIII_energy_and_industry_subgroup_1990.pdf
- [2] Data, O. W. I. (2024). CO₂ Emissions. In *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
- [3] Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). Environmental Impacts of A North American Free Trade Agreement. *National Bureau of Economic Research Working Paper*, 3914. <https://doi.org/10.3386/w3914>
- [4] Mahmood, H. (2020). CO₂ Emissions, Financial Development, Trade, and Income in North America: A Spatial Panel Data Approach. *Sage Open*, 10(4), 2158244020968085. <https://doi.org/10.1177/2158244020968085>
- [5] Jin, T., & Kim, J. (2020). Investigating the environmental Kuznets curve for Annex I countries using heterogeneous panel data analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(9), 10039–10054. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07668-w>
- [6] Koshta, N., Bashir, H. A., & Samad, T. A. (2020). Foreign trade, financial development, agriculture, energy consumption and CO₂ emission: testing EKC among emerging economies. *Indian Growth and Development Review*, 14(1), 50–80. <https://doi.org/10.1108/IGDR-10-2019-0117>
- [7] Solarin, S. A., Al-Mulali, U., Musah, I., & Ozturk, I. (2017). Investigating the pollution haven hypothesis in Ghana: An empirical investigation. *Energy*, 124, 706–719. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.089>
- [8] Ochoa-Moreno, W.-S., Quito, B. A., & Moreno-Hurtado, C. A. (2021). Foreign Direct Investment and Environmental Quality: Revisiting the EKC in Latin American Countries. *Sustainability*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/su132212651>
- [9] Mert, M., & Bölük, G. (2016). Do foreign direct investment and renewable energy consumption affect the CO₂ emissions? New evidence from a panel ARDL approach to Kyoto Annex countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(21), 21669–21681. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7413-7>
- [10] Nguyen, C. P., Schinckus, C., & Dinh Su, T. (2020). Economic integration and CO₂ emissions: evidence from emerging economies. *Climate and Development*, 12(4), 369–384. <https://doi.org/10.1080/17565529.2019.1630350>
- [11] Ahmed, Z., & Le, H. P. (2021). Linking Information Communication Technology, trade globalization index, and CO₂ emissions: evidence from advanced panel techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 8770–8781. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11205-0>
- [12] Koirala, B., Pradhan, G., & Mensah, E. C. (2025). The Environmental Kuznets Curve and CO₂ Emissions Under Policy Uncertainty in G7 Countries. In *Economies* (Vol. 13, Issue 12, p. 363). <https://doi.org/10.3390/economies13120363>

- [13] Freire-González, J., Padilla Rosa, E., & Raymond, J. L. (2024). World economies' progress in decoupling from CO2 emissions. *Scientific Reports*, 14(1), 20480. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71101-2>
- [14] Wani, M. J. G., Loganathan, N., Alamir, I. A., Mujalli, A., & Almgrashi, A. (2025). Examining the emissions-growth nexus: carbon impact, economic expansion, FDI, globalization, and trade in leading economies. *Journal of Applied Economics*, 28(1), 2554712. <https://doi.org/10.1080/15140326.2025.2554712>
- [15] Liu, Y., & Guo, M. (2023). The impact of FDI on haze pollution: "Pollution paradise" or "pollution halo?"--Spatial analysis of PM2.5 concentration raster data in 283 cities. *Frontiers in Environmental Science, Volume 11-2023*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1133178>
- [16] Abdelgany, M. F., & Gad-Elhak, A. G. M. (2022). Effect of FDI on CO2 Emissions: Panel Study from Developing Countries. *International Journal of Economy, Energy and Environment*, 7(4), 87–99. <https://doi.org/10.11648/j.ijeee.20220704.12>
- [17] Duan, Y., & Jiang, X. (2021). Pollution haven or pollution halo? A Re-evaluation on the role of multinational enterprises in global CO2 emissions. *Energy Economics*, 97, 105181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105181>
- [18] Li, B., & Haneklaus, N. (2022). Reducing CO2 emissions in G7 countries: The role of clean energy consumption, trade openness and urbanization. *Energy Reports*, 8, 704–713. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.238>