Pertumbuhan Ekonomi, Industri, dan Emisi CO_2 di Negara Berkembang Asia: Analisis EKC

Reza Aulia[1], Emi Maimunah[2], Nindya Eka Sobita[3]
Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Lampung, Bandar Lampung[1,2,3]
rezaauila7704@gmail.com[1], emi.maimunah@feb.unila.ac.id [2], nindya.eka@feb.unila.ac.id [3]

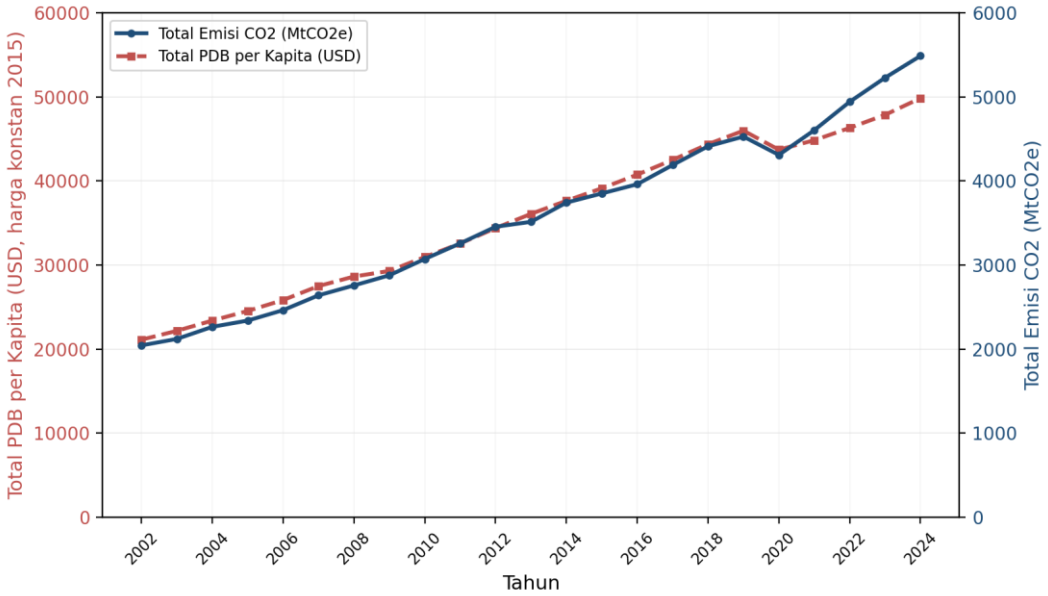
Abstract
Purpose: This study examines the relationship between economic growth and total carbon emissions in 16 developing Asian countries over the period 2002–2024, focusing on the Environmental Kuznets Curve (EKC) and the role of economic and structural factors.
Methodology/approach: Total CO_2 emissions are represented by Y, while GDP per capita (X1), its squared logarithmic term (X2), foreign direct investment (X3), industrial value added (X4), urbanization (X5), and a COVID-19 period dummy (X6) are included as explanatory variables. The balanced panel comprises 368 observations. The empirical analysis applies the Im–Pesaran–Shin panel unit-root test and Panel Autoregressive Distributed Lag estimation using Mean Group (MG) and Pooled Mean Group (PMG) estimators, with the final estimator selected through the Hausman test. The lag structure is specified as ARDL (1,0,.): one lag of the dependent variable in the long-run relationship and no additional lags in the short-run changes of the independent variables.
Results/findings The Model 1 results, for which MG is selected, do not provide statistically significant evidence of the expected inverted-U relationship because the long-run coefficients of X1 and X2 are statistically insignificant. In Model 2, PMG is selected; X1 has a positive and statistically significant long-run association with Y, X3 and X5 are statistically insignificant, and X4 has a negative association significant at the 10% level. The error-correction term in Model 2 is negative but statistically insignificant. In the short run, D. lnX1 is positive and significant, whereas the other reported short-run terms, including X6, are not statistically significant.
Contribution: The findings do not provide robust statistical support for the EKC in Model 1, while the extended model indicates a positive long-run association between GDP per capita and total CO_2 emissions.

Keywords: *Environmental Kuznets Curve, Total CO_2 Emissions, Industrialization, Foreign Direct Investment, Developing Asia*

1. Pendahuluan

Perubahan iklim dan peningkatan emisi gas rumah kaca menjadi salah satu konsekuensi penting dari proses pembangunan ekonomi. Karbon dioksida (CO_2) memiliki posisi sentral dalam persoalan tersebut karena sebagian besar emisi antropogenik berkaitan dengan penggunaan bahan bakar fosil dan aktivitas produksi. Sektor industri, khususnya manufaktur, konstruksi, pertambangan, dan utilitas, memiliki keterkaitan erat dengan penggunaan energi dan karenanya menjadi bagian penting dalam pembahasan hubungan antara pembangunan ekonomi dan tekanan lingkungan (IPCC, 2021). Kondisi tersebut menciptakan dilema bagi negara berkembang: ekspansi ekonomi dan industrialisasi diperlukan untuk meningkatkan pendapatan serta memperbaiki kesejahteraan, tetapi proses yang sama dapat meningkatkan kebutuhan energi dan emisi karbon.

Persoalan tersebut menjadi semakin relevan di kawasan Asia. Asia tidak hanya merupakan kawasan dengan populasi besar, tetapi juga menjadi salah satu pusat aktivitas produksi dan industrialisasi dunia. Dengan demikian, perubahan aktivitas ekonomi di negara-negara berkembang Asia memiliki implikasi terhadap emisi yang tidak hanya bersifat domestik, tetapi juga berkaitan dengan posisi kawasan tersebut dalam rantai produksi global. Pada saat yang sama, karakteristik negara berkembang Asia berbeda dengan negara maju yang telah mengalami transformasi struktural menuju perekonomian berbasis jasa dan teknologi. Sebagian negara dalam kelompok ini masih berada pada tahap industrialisasi yang relatif intensif sehingga peningkatan pendapatan belum tentu diikuti oleh penurunan tekanan lingkungan.



Gambar 1. Grafik Tren Emisi Karbon (CO2) dan PDB per Kapita 16 negara Berkembang Asia
Sumber: Data World Bank (2026)

Perkembangan emisi CO_2 total dan PDB per kapita selama 2002–2024 perlu dibaca dengan mempertimbangkan perbedaan karakteristik antarnegara. Dalam penelitian ini, Y merepresentasikan emisi CO_2 total. Oleh karena itu, pembacaan grafik, statistik deskriptif, dan hasil estimasi diarahkan pada perubahan emisi nasional total, bukan emisi yang telah dibagi dengan jumlah penduduk. Perbedaan pola antarnegara juga menunjukkan bahwa peningkatan pendapatan tidak selalu diikuti perubahan emisi total dengan besaran yang seragam.

Perbedaan pola tersebut penting dalam kaitannya dengan Environmental Kuznets Curve (EKC). Hipotesis EKC menyatakan bahwa hubungan antara pendapatan dan degradasi lingkungan pada awalnya dapat berbentuk positif, tetapi setelah mencapai tingkat pendapatan tertentu hubungan tersebut berbalik sehingga peningkatan pendapatan justru disertai perbaikan lingkungan (Grossman & Krueger, 1995). Dalam konteks negara berkembang Asia, pertanyaan yang muncul bukan hanya apakah pertumbuhan ekonomi meningkatkan emisi, tetapi apakah negara-negara tersebut telah mencapai titik balik sebagaimana diprediksikan EKC.

Untuk menilai hubungan tersebut, penelitian ini membedakan perubahan emisi CO_2 total dari perubahan ukuran ekonomi. Rasio emisi terhadap PDB atau elastisitas emisi terhadap PDB tidak dapat disimpulkan hanya dari pergerakan dua seri pada grafik; pengukuran decoupling memerlukan definisi dan perhitungan tersendiri. Oleh sebab itu, pembahasan difokuskan pada hubungan antara Y dan PDB per kapita, sedangkan pengujian formal hubungan jangka panjang dan jangka pendek dilakukan melalui model ekonometrika.

Selain pertumbuhan ekonomi, karakteristik sektor industri perlu diperhatikan karena PDB per kapita merupakan ukuran agregat yang mencakup berbagai aktivitas ekonomi. Nilai tambah industri menggambarkan perkembangan aktivitas produksi industri yang dapat berkaitan dengan penggunaan energi dan emisi. Namun, hubungan antara nilai tambah industri dan emisi total tidak selalu searah karena dapat dipengaruhi oleh komposisi subsektor, efisiensi energi, teknologi produksi, serta struktur energi di masing-masing negara. Oleh karena itu, X4 dimasukkan secara terpisah dari X1 agar hubungan keduanya dengan Y dapat dianalisis.

Faktor lain yang relevan adalah arus Foreign Direct Investment (FDI). Literatur mengenai hubungan FDI dan lingkungan menghasilkan dua kemungkinan yang berlawanan. Pollution Haven Hypothesis (PHH) menyatakan bahwa perbedaan regulasi lingkungan dapat mendorong perpindahan aktivitas produksi yang relatif polutif ke negara berkembang, sedangkan Pollution Halo Hypothesis menekankan

kemungkinan transfer teknologi dan praktik produksi yang lebih bersih melalui investasi asing. Perbedaan karakteristik FDI antarnegara menyebabkan arah hubungan tersebut tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan perubahan nominal investasi. Data penelitian juga memperlihatkan variasi FDI yang besar antarnegara dan waktu.

Urbanisasi juga memiliki posisi penting dalam hubungan pembangunan dan lingkungan. Populasi perkotaan pada 16 negara sampel meningkat dari sekitar 629,5 juta jiwa pada 2002 menjadi 1,085 miliar jiwa pada 2024. Pertumbuhan kota dapat meningkatkan emisi melalui kebutuhan energi, transportasi, pembangunan infrastruktur, dan konsumsi. Namun, konsentrasi penduduk juga dapat menciptakan efisiensi melalui kepadatan dan penyediaan infrastruktur publik yang lebih efisien. Oleh karena itu, pengaruh urbanisasi terhadap emisi tidak dapat ditentukan hanya dari arah pertumbuhan penduduk perkotaan.

Pandemi COVID-19 memberikan dimensi tambahan karena mengganggu aktivitas ekonomi, mobilitas, dan produksi. Perubahan emisi selama periode tersebut dapat mencerminkan gangguan sementara yang berbeda antarnegara. Untuk mengendalikan kemungkinan perubahan tersebut, penelitian memasukkan X6 sebagai variabel dummy periode pandemi. Interpretasi pengaruh X6 harus didasarkan pada koefisien dan tingkat signifikansi hasil estimasi yang disajikan secara lengkap pada tabel Model 2.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa bukti empiris mengenai EKC dan hubungan FDI dengan emisi masih belum konsisten. (Handoyo et al., 2022). menemukan bukti EKC di Asia dengan pendekatan panel, tetapi menunjukkan adanya variasi turning point antarnegara. Sebaliknya, penelitian lain menemukan bukti yang lebih terbatas atau bahkan tidak menemukan EKC. (Iskandar, 2019), (Setiawan & Anwar, 2022), serta (Massagony & Budiono, 2023) menunjukkan bahwa hasil pengujian di Indonesia juga belum menghasilkan kesimpulan yang sepenuhnya seragam. Studi mengenai FDI turut memberikan hasil yang berbeda, baik yang mendukung PHH maupun pollution halo.

Berdasarkan kondisi tersebut, masih terdapat ruang penelitian pada beberapa aspek. Pertama, sebagian penelitian terdahulu berfokus pada satu negara atau subkawasan tertentu sehingga belum sepenuhnya menggambarkan heterogenitas negara berkembang Asia. Kedua, pertumbuhan ekonomi sering digunakan sebagai ukuran agregat tanpa memisahkan perkembangan sektor industri sebagai determinan tersendiri. Ketiga, periode pandemi dan pemulihan ekonomi perlu dipertimbangkan karena dapat menghasilkan perubahan sementara pada hubungan ekonomi dan emisi. Penelitian ini merespons kesenjangan tersebut dengan menggunakan panel 16 negara berkembang Asia selama 2002–2024, memasukkan nilai tambah industri, FDI, urbanisasi, serta variabel dummy COVID-19 ke dalam analisis. Dengan demikian, penelitian ini memiliki dua tujuan utama. Pertama, menguji apakah hubungan antara PDB per kapita dan Y di negara berkembang Asia mengikuti pola EKC. Kedua, menganalisis hubungan PDB per kapita, FDI, nilai tambah industri, urbanisasi, dan periode COVID-19 dengan Y dalam jangka panjang dan jangka pendek. Untuk menjawab kedua tujuan tersebut, penelitian menggunakan pendekatan Panel ARDL dengan estimator yang dipilih berdasarkan uji Hausman.

2. Tinjauan pustaka dan pengembangan hipotesis

Penelitian mengenai hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan kualitas lingkungan telah menghasilkan temuan yang beragam. Perbedaan hasil tersebut terlihat terutama dalam pengujian Environmental Kuznets Curve (EKC), hubungan investasi asing langsung dengan emisi karbon, serta peran aktivitas industri dan faktor struktural lainnya.

Hubungan antara pertumbuhan ekonomi, investasi asing langsung, dan emisi karbon pada negara berkembang dan negara maju telah dianalisis menggunakan pendekatan System GMM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Pollution Haven Hypothesis lebih terlihat pada kelompok negara berkembang, sedangkan Pollution Halo Hypothesis lebih sesuai dengan karakteristik negara maju. Penelitian tersebut juga tidak menemukan bukti EKC pada kelompok negara berkembang. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan pendapatan belum secara otomatis diikuti oleh perbaikan kualitas lingkungan pada negara yang masih berada dalam proses pembangunan (Benzerrouk et al., 2021).

Hubungan industrialisasi, energi terbarukan, pertumbuhan ekonomi, dan emisi karbon pada sembilan negara ASEAN telah dianalisis menggunakan pendekatan PMG-ARDL. Hasilnya menunjukkan adanya indikasi EKC dalam jangka pendek pada sebagian besar negara yang diteliti. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa energi terbarukan berperan dalam hubungan antara nilai tambah industri dan emisi karbon. Temuan ini memperlihatkan bahwa perkembangan sektor industri tidak dapat dilepaskan dari jenis teknologi dan sumber energi yang digunakan dalam proses produksi (Claire & Widyawati, 2023).

Hubungan investasi asing langsung, perdagangan, pariwisata, pertumbuhan ekonomi, dan emisi karbon di kawasan Asia telah diteliti dengan menguji EKC sekaligus *Pollution Haven Hypothesis* serta mempertimbangkan interaksi antara investasi asing dan faktor perdagangan. Hasilnya menunjukkan pentingnya melihat hubungan investasi dan emisi dalam konteks karakteristik negara penerima investasi. Dengan demikian, pengaruh FDI terhadap lingkungan tidak dapat dianggap seragam untuk seluruh negara Asia (Handoyo et al., 2022).

Pengaruh FDI terhadap emisi karbon di negara-negara ASEAN telah dianalisis dengan mempertimbangkan GDP, keterbukaan perdagangan, struktur industri, populasi, dan energi terbarukan. Hasil kajian tersebut menempatkan hubungan FDI dan emisi dalam konteks struktur perekonomian serta karakteristik aktivitas produksi negara penerima investasi. Penelitian ini relevan dengan studi sekarang karena X3 tidak hanya dianalisis secara terpisah, tetapi juga ditempatkan bersama variabel ekonomi dan struktural lainnya (Febriyanto et al., 2024).

Keberadaan EKC di Indonesia telah diuji menggunakan pendekatan ARDL/ECM dengan GDP dan kuadrat GDP sebagai variabel utama. Analisis tersebut secara khusus menguji apakah peningkatan aktivitas ekonomi pada akhirnya dapat menghasilkan titik balik dalam hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan emisi CO_2. Studi ini menjadi salah satu dasar empiris bagi pengujian hubungan kuadratik antara X1 dan X2 dalam penelitian yang lebih luas pada negara berkembang Asia (Iskandar, 2019).

Hubungan nilai tambah industri, konsumsi energi, dan ecological footprint di Indonesia telah menjadi fokus penelitian yang menempatkan aktivitas industri sebagai faktor yang berkaitan langsung dengan tekanan lingkungan. Temuan tersebut memperkuat alasan untuk memasukkan X4 secara terpisah dari X1, karena pertumbuhan ekonomi agregat tidak selalu mampu menggambarkan perubahan struktur produksi dan kontribusi sektor industri terhadap lingkungan (Kurniawati, 2022).

Hubungan pertumbuhan ekonomi dan lingkungan di Indonesia telah diuji dengan menggunakan GDP, kuadrat GDP, populasi, konsumsi energi listrik, dan perdagangan internasional. Penelitian tersebut menemukan pola U dalam hubungan pertumbuhan ekonomi dan lingkungan. Temuan ini menunjukkan bahwa bentuk hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan lingkungan dapat berbeda bergantung pada variabel yang digunakan serta karakteristik perekonomian yang diamati (Setiawan & Anwar, 2022).

Hubungan pertumbuhan ekonomi dan FDI di Indonesia telah dianalisis dalam kerangka EKC dan Pollution Haven Hypothesis. Hasil penelitian mendukung keberadaan EKC sekaligus menunjukkan bahwa FDI meningkatkan degradasi lingkungan, sedangkan energi terbarukan memiliki arah yang berlawanan. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa pengaruh FDI terhadap emisi dapat berjalan melalui mekanisme yang berbeda, bergantung pada karakteristik investasi dan kondisi ekonomi negara penerima (Leonardo et al., 2023).

Validitas EKC terhadap emisi CO_2 di Indonesia telah diuji menggunakan pendekatan ARDL. Penelitian tersebut tidak menemukan bukti keberlakuan EKC. Sebaliknya, energi fosil ditemukan meningkatkan emisi, sementara energi terbarukan dan kebijakan terkait hutan menunjukkan arah yang lebih mendukung perbaikan lingkungan. Hasil tersebut memperkuat adanya perbedaan temuan empiris mengenai keberadaan turning point dalam hubungan pertumbuhan ekonomi dan emisi (Massagony & Budiono, 2022).

Hubungan GDP, FDI, industri, jasa, dan konsumsi listrik rumah tangga dengan emisi karbon telah diuji menggunakan beberapa pendekatan estimasi panel. Penelitian tersebut menemukan hubungan nonlinear

antara GDP dan emisi, tetapi polanya tidak membentuk EKC berbentuk U terbalik. Pada saat yang sama, FDI memiliki hubungan negatif dengan emisi sehingga lebih mendukung Pollution Halo Hypothesis. Temuan ini menunjukkan bahwa hubungan pertumbuhan ekonomi, FDI, dan emisi dapat menghasilkan pola yang berbeda dari prediksi teori dasar EKC maupun Pollution Haven Hypothesis (Polloni-Silva et al., 2021). menguji hubungan GDP, FDI, industri, jasa, dan konsumsi listrik rumah tangga dengan emisi karbon menggunakan beberapa pendekatan estimasi panel. Penelitian tersebut menemukan adanya hubungan nonlinear antara GDP dan emisi, tetapi pola tersebut tidak membentuk EKC berbentuk U terbalik.

2.1. Pengembangan Hipotesis

Berdasarkan teori dan temuan penelitian terdahulu, penelitian ini merumuskan dugaan hubungan antarvariabel sebagai berikut. Pertama, kerangka EKC memprediksi bahwa hubungan pendapatan dan tekanan lingkungan berbentuk U terbalik. Dengan demikian, koefisien X1 diharapkan positif dan koefisien X2 negatif, serta keduanya perlu didukung signifikansi statistik untuk memberikan bukti empiris EKC.

Kedua, hubungan X3 dengan Y dapat mengikuti dua mekanisme. Pollution Haven Hypothesis memprediksi hubungan positif apabila investasi asing meningkatkan aktivitas produksi yang lebih intensif polusi, sedangkan Pollution Halo Hypothesis memprediksi hubungan negatif apabila investasi membawa teknologi dan praktik produksi yang lebih bersih. Karena kedua mekanisme tersebut memiliki arah dugaan yang berlawanan, pengujian X3 dalam penelitian ini diperlakukan sebagai pengujian empiris atas arah hubungan, bukan sebagai pengukuran langsung perpindahan industri atau perbedaan regulasi lingkungan.

Ketiga, peningkatan nilai tambah industri (X4) dan urbanisasi (X5) berpotensi meningkatkan Y melalui kebutuhan energi, produksi, transportasi, dan pembangunan infrastruktur. Namun, arah hubungan keduanya dapat dipengaruhi efisiensi teknologi, struktur industri, serta sumber energi yang digunakan. Oleh karena itu, dugaan arah positif merupakan ekspektasi teoritis awal yang tetap perlu diuji secara empiris.

Keempat, X6 dimasukkan sebagai variabel kontrol untuk menangkap perubahan pada periode pandemi COVID-19. Arah koefisiennya tidak ditetapkan secara kaku karena besarnya perubahan emisi dapat berbeda antarnegara dan dipengaruhi oleh pembatasan mobilitas serta perubahan komposisi aktivitas ekonomi.

2.2. Research Gap

Berdasarkan penelitian terdahulu tersebut, masih terdapat beberapa kesenjangan yang menjadi dasar penelitian ini. Pertama, hasil pengujian EKC masih menunjukkan ketidakkonsistenan. Beberapa penelitian menemukan pola yang mendukung EKC, sedangkan penelitian lainnya tidak menemukan bukti adanya hubungan U terbalik. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keberadaan turning point antara pertumbuhan ekonomi dan emisi masih bergantung pada karakteristik negara, periode pengamatan, serta spesifikasi model yang digunakan.

Kedua, penelitian terdahulu mengenai negara Asia banyak menggunakan GDP sebagai indikator utama pertumbuhan ekonomi, sementara perubahan struktur industri belum selalu dipisahkan secara eksplisit dari pengaruh pertumbuhan ekonomi. Padahal, data penelitian menunjukkan bahwa nilai tambah industri pada 16 negara sampel meningkat secara substansial selama periode pengamatan. Oleh karena itu, X4 perlu ditempatkan sebagai variabel tersendiri agar hubungan antara aktivitas industri dan Y dapat dianalisis di luar pengaruh X1.

Ketiga, penelitian sebelumnya juga menunjukkan hasil yang berbeda mengenai hubungan X3 dengan Y. Sebagian penelitian menemukan dukungan terhadap Pollution Haven Hypothesis, sedangkan penelitian lainnya menemukan hubungan yang lebih sesuai dengan Pollution Halo Hypothesis. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa pengaruh investasi asing terhadap lingkungan belum memiliki kesimpulan yang seragam dalam konteks negara berkembang.

Keempat, masih terbatas penelitian yang secara bersamaan menguji X1 dan X2 untuk EKC, kemudian memperluas model dengan X3, X4, X5, dan X6 pada kelompok negara berkembang Asia dengan periode pengamatan yang panjang. Penelitian ini mengisi celah tersebut melalui data panel 16 negara berkembang Asia selama 2002–2024 serta menggunakan pendekatan Panel ARDL dengan estimator PMG untuk membedakan hubungan jangka panjang dan jangka pendek. Selain itu, X6 dimasukkan untuk mengendalikan gangguan akibat pandemi COVID-19 yang menyebabkan perubahan tajam pada pola emisi selama periode 2020–2022.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menguji apakah hubungan X1 dan Y membentuk EKC, tetapi juga mengidentifikasi apakah hubungan tersebut tetap konsisten setelah mempertimbangkan X3, X4, X5, dan X6. Pendekatan tersebut diharapkan memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai faktor-faktor yang berkaitan dengan perubahan Y pada negara berkembang Asia.

3. Metodologi penelitian

3.1. Jenis Penelitian dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-eksplanatif dengan data panel yang menggabungkan dimensi antarnegara dan waktu. Pendekatan tersebut digunakan untuk menganalisis hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan emisi karbon serta mengidentifikasi determinan yang berkaitan dengan perubahan emisi dalam jangka pendek dan jangka panjang. Data penelitian mencakup 16 negara berkembang di Asia selama periode 2002–2024, sehingga menghasilkan 368 observasi. Negara yang dianalisis meliputi Bangladesh, Bhutan, Kamboja, India, Indonesia, Kyrgyzstan, Laos, Mongolia, Myanmar, Nepal, Pakistan, Filipina, Sri Lanka, Thailand, Uzbekistan, dan Vietnam.

Pemilihan negara didasarkan pada klasifikasi negara berkembang di Asia dan ketersediaan data yang memadai untuk seluruh variabel penelitian. Periode pengamatan dipilih karena memungkinkan analisis dinamika hubungan ekonomi dan lingkungan dalam jangka panjang serta mencakup periode sebelum dan selama gangguan ekonomi akibat pandemi COVID-19. Seluruh data utama diperoleh dari World Development Indicators (WDI) World Bank.

Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak Stata untuk pengolahan data, pengujian stasioneritas, kointegrasi, pemilihan estimator, serta estimasi model. Pengolahan dilakukan menggunakan perangkat komputer sebagai perangkat keras pendukung analisis.

3.2. Variabel Penelitian

Tabel 1. Deskripsi Variabel

No	Nama Data (Kode WDI)	Sumber Data	Satuan	Simbol
1	Total Emisi CO_2 (EN.GHG.CO2.MT.CE.AR5)	World Bank	Metrikton	Y
2	Pendapatan Domestik Bruto per Kapita (NY.GDP.PCAP.KD)	World Bank	USD	X1
3	Nilai Kuadratik Pendapatan Domestik Bruto	Konstruksi Peneliti	USD	X2
4	Foreign Direct Investment (BX.KLT.DINV.WD.GD.ZS)	World Bank	Persen (%)	X3
5	Nilai Tambah Industri (NV.IND.TOTL.KD)	World Bank	USD	X4
6	Urbanisasi (SP.URB.TOTL)	World Bank	Jiwa	X5
7	Dummy Covid-19	Konstruksi Peneliti	Binary	X6

Sumber: Data diproses menggunakan Stata (2026)

3.3. Spesifikasi Model

Penelitian menggunakan dua model. Model 1 digunakan untuk menguji Environmental Kuznets Curve (EKC) dengan melihat hubungan nonlinier antara X1 dan Y. Spesifikasi hubungan jangka panjang Model 1 dinyatakan sebagai:

$$\ln(Y)_{it} = \alpha_0 + \beta_1 \ln(X1)_{it} + \beta_2 \ln(X2)_{it} + uit$$

Di mana:

$\ln(CO2)_{it}$ = Logaritma Emisi CO2 per kapita negara i pada periode t
$\ln(PDB)_{it}$ = Logaritma Pendapatan Domestik Bruto negara i pada periode t
$\ln(PDB)^2_{it}$ = Nilai Kuadrat Logaritma Pendapatan Domestik Bruto negara i pada periode t
α = Koefisien kecepatan penyesuaian (*speed of adjustment*)
$\beta_1 - \beta_5$ = Koefisien jangka panjang
i = Negara (1,...,17)
t = Waktu (2002,...,2024)

Model 2 digunakan untuk menganalisis determinan Y dengan memasukkan variable X1, X3, X4, X5 dan X6:

$$\ln(CO2) = \alpha_0 + \beta_1 \ln(PDB)_{it} + \beta_2 FDI_{it} + \beta_3 \ln(PNI)_{it} + \beta_4 \ln(U)_{it} + \beta_5 D_{it}\, u + it$$

Di mana:

$\ln(CO2)_{it}$ = Logaritma Emisi CO2 per kapita negara i pada periode t
$\ln(PDB)_{it}$ = Logaritma Pendapatan Domestik Bruto negara i pada periode t
FDI_{it} = Investasi asing langsung negara i pada periode t
$\ln(PNI)_{it}$ = Logaritma Nilai Tambah Industri negara i pada periode t
$\ln(U)_{it}$ = Logaritma Jumlah Penduduk Perkotaan negara i pada periode t
D_{it} = *Dummy* pandemi Covid-19
α = Koefisien kecepatan penyesuaian (*speed of adjustment*)
$\beta_1 - \beta_5$ = Koefisien jangka panjang
i = Negara (1,...,17)
t = Waktu (2002,...,2024)

Kedua model tersebut memungkinkan penelitian membedakan pengujian EKC secara khusus dari analisis determinan emisi yang lebih luas.

Transformasi logaritma natural (ln) diterapkan pada beberapa variabel, yaitu emisi CO_2, PDB per kapita, nilai tambah industri, serta kuadrat PDB per kapita pada. Penggunaan transformasi logaritma bertujuan untuk menyetarakan skala pengukuran antarvariabel yang memiliki rentang nilai berbeda, mengurangi potensi ketidakseimbangan distribusi data, serta mempermudah interpretasi hubungan antarvariabel dalam bentuk elastisitas. Selain itu, transformasi logaritma memungkinkan hubungan ekonomi yang bersifat multiplikatif untuk dianalisis dalam bentuk yang lebih linear.

Secara khusus, penggunaan logaritma pada variabel PDB per kapita dan kuadrat PDB per kapita juga bertujuan untuk menguji kemungkinan hubungan nonlinier antara pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan sebagaimana dijelaskan dalam hipotesis Environmental Kuznets Curve (EKC). Dengan demikian, pengaruh pertumbuhan ekonomi terhadap emisi CO_2 dapat dianalisis melalui hubungan antara tingkat pendapatan per kapita dan bentuk kuadratiknya.

Sementara itu, variabel Foreign Direct Investment (FDI) dan urbanisasi tidak ditransformasikan ke dalam bentuk logaritma karena mempertimbangkan karakteristik pengukuran dan spesifikasi variabel dalam penelitian. Seluruh variabel yang digunakan selanjutnya diuji stasioneritasnya untuk mengidentifikasi derajat integrasi masing-masing variabel sebelum dilakukan estimasi Panel Autoregressive Distributed Lag (Panel ARDL).

3.4. Tahapan Analisis Ekonometrika

Karena hasil uji IPS menunjukkan kombinasi variabel I(0) dan I(1), pendekatan Panel ARDL digunakan untuk mengestimasi hubungan jangka pendek dan jangka panjang, dengan syarat tidak terdapat variabel

I(2). Estimasi dilakukan menggunakan estimator Mean Group (MG) dan Pooled Mean Group (PMG). Pemilihan estimator akhir untuk setiap model didasarkan pada hasil uji Hausman.

Estimasi Panel ARDL dilakukan menggunakan Pooled Mean Group (PMG) dan Mean Group (MG). PMG membatasi koefisien jangka panjang agar homogen antarnegara, tetapi memungkinkan koefisien jangka pendek dan kecepatan penyesuaian berbeda. Sebaliknya, MG mengestimasi hubungan secara terpisah untuk setiap negara sehingga koefisien jangka panjang maupun jangka pendek dapat berbeda. Pemilihan estimator dilakukan menggunakan uji Hausman: hipotesis nol mendukung PMG, sedangkan penolakan hipotesis nol mendukung MG. Pada penelitian ini, hasil Hausman menetapkan MG untuk Model 1 dan PMG untuk Model 2.

Spesifikasi Panel ARDL yang digunakan menerapkan satu lag pada variabel dependen dalam hubungan jangka panjang, tanpa lag tambahan pada komponen perubahan jangka pendek variabel dependen. Variabel independen dimasukkan dalam bentuk perubahan pertama tanpa lag perubahan tambahan. Dengan demikian, struktur model dapat dinyatakan sebagai ARDL(1,0,...). Spesifikasi lag tersebut merupakan spesifikasi yang digunakan dalam estimasi. Pengujian signifikansi dilakukan berdasarkan p-value koefisien. Untuk Model 1, dukungan terhadap EKC memerlukan koefisien X1 positif dan X2 negatif serta signifikansi statistik yang memadai. Untuk Model 2, hubungan X1, X3, X4, X5, dan X6 dengan Y dianalisis menurut horizon jangka panjang dan jangka pendek.

4. Hasil dan pembahasan

4.1. Uji Stasioneritas

Tabel 2. Uji Stasioneritas Im-Pesaran-Shin (IPS)

Variabel	p-value	First Difference p-value	Orde Integrasi
Y	0,9903	0,0000	I(1)
X1	0,2891	0,0000	I(1)
X2	0,8010	0,0000	I(1)
X3	0,0000	-	I(0)
X4	0,5200	0,0000	I(1)
X5	0,0000	-	I(0)

Sumber: Data diproses menggunakan Stata (2026)

Hasil pada Tabel 2 menunjukkan bahwa Y, X1, X2, dan X4 belum stasioner pada tingkat level karena memiliki p-value lebih besar dari 0,05. Setelah dilakukan first difference, keempat variabel tersebut menjadi stasioner dengan p-value 0,0000. Sementara itu, X3 dan X5 telah stasioner pada tingkat level dengan p-value 0,0000.

Dengan demikian, variabel penelitian memiliki kombinasi tingkat integrasi I(0) dan I(1) dan tidak terdapat variabel yang terintegrasi pada tingkat I(2). Kondisi tersebut memenuhi karakteristik yang diperlukan untuk melanjutkan estimasi menggunakan pendekatan Panel ARDL.

4.2. Estimasi Model 1: Pengujian Environmental Kuznets Curve

1. Jangka Panjang

Tabel 3. Hasil Estimasi Jangka Panjang Model 1 (MG dan PMG)

Variabel	MG Koefisien	p-value	PMG Koefisien	p-value
X1	2,856885	0,689	10,69458	0,000
X2	-1,137604	0,787	-0,5847724	0,000

Sumber: Data diproses menggunakan Stata (2026)

2. Jangka Pendek

Tabel 4. Hasil Estimasi Jangka Pendek Model 1 (MG dan PMG)

Variabel	MG Koefisien	p-value	PMG Koefisien	p-value
ECT	-0,519514	0,000	-0,2025268	0,000
ΔX1	0,8410575	0,864	4,424583	0,494
ΔX2	-0,0226473	0,944	-0,2939982	0,501

Sumber: Data diproses menggunakan Stata (2026)

3. Uji Hausman

Tabel 5. Uji Haustman (Model 1)

Statistik	Nilai
Chi-square	26,87
Prob > Chi-square	0,000

Sumber: Data diproses menggunakan Stata (2026)

Berdasarkan Uji Hausman, Model 1 menghasilkan probabilitas sebesar 0,000, lebih kecil dari 0,05, sehingga estimator MG dipilih sebagai dasar interpretasi.

Pada estimasi jangka panjang, hasil MG menunjukkan bahwa X1 memiliki hubungan positif, sedangkan X2 memiliki hubungan negatif terhadap emisi CO_2 total. Namun, keduanya tidak signifikan secara statistik. Sebaliknya, hasil PMG menunjukkan bahwa kedua variabel signifikan dengan arah koefisien yang sesuai dengan prediksi teori Environmental Kuznets Curve (EKC). Meskipun demikian, karena MG merupakan estimator terpilih, hasil tersebut belum memberikan bukti statistik yang memadai untuk mendukung hipotesis EKC.

Pada jangka pendek, hasil estimasi MG maupun PMG menunjukkan bahwa perubahan X1 dan X2 tidak berpengaruh signifikan terhadap emisi CO_2 total. Dengan demikian, perubahan pendapatan per kapita dan bentuk kuadratiknya belum menunjukkan hubungan jangka pendek yang signifikan dengan emisi CO_2.

Sementara itu, nilai ECT pada kedua estimator menunjukkan tanda negatif dan signifikan. Hal ini mengindikasikan adanya mekanisme penyesuaian menuju keseimbangan jangka panjang. Berdasarkan estimator MG yang terpilih, sekitar 51,95% penyimpangan dari keseimbangan jangka panjang dapat dikoreksi dalam satu periode. Hasil PMG juga menunjukkan mekanisme penyesuaian yang signifikan, meskipun dengan kecepatan penyesuaian yang lebih rendah.

4.3. Estimasi Model 2: Determinan Y

1. Jangka Panjang

Tabel 6. Uji ARDL MG dan PMG (MG dan PMG)

Variabel	MG Koefisien	p-value	PMG Koefisien	p-value
X1	3,77375	0,006	6,691295	0,003
X3	-0,025222	0,642	0,015687	0,378
X4	-1,449545	0,086	-1,72682	0,089
X5	0,8957473	0,562	1,46349	0,330

Sumber: Data diproses menggunakan Stata (2026)

2. Jangka Pendek

Tabel 7. Hasil Estimasi Jangka Panjang Model 1 (MG dan PMG)

Variabel	MG Koefisien	p-value	PMG Koefisien	p-value
ECT	-0,8027806	0,000	-0,0770464	0,171
ΔX1	-0,1787522	0,796	0,869697	0,002
ΔX3	-0,0083268	0,574	0,010234	0,370
ΔX4	0,7193193	0,068	0,0854648	0,699

ΔX5	7,720922	0,354	9,553314	0,218
X6	0,0704835	0,142	-0,0122077	0,670

Sumber: Data diproses menggunakan Stata (2026)

3. Uji Hausman

Tabel 8. Uji Hausman (Model 2)

Statistik	Nilai
Chi-square	1,09
Prob > Chi-square	0,8964

Sumber: Data diproses menggunakan Stata (2026)

Berdasarkan Uji Hausman, Model 2 menghasilkan probabilitas sebesar 0,8964, lebih besar dari 0,05, sehingga estimator PMG dipilih sebagai dasar interpretasi.

Pada estimasi jangka panjang, hasil MG dan PMG secara umum menunjukkan pola yang konsisten. Variabel X1 memiliki hubungan positif dan signifikan terhadap emisi CO_2 total, sedangkan X4 memiliki hubungan negatif dan signifikan pada tingkat 10%. Sementara itu, X3 dan X5 tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan secara statistik. Konsistensi arah dan signifikansi kedua estimator memperkuat temuan bahwa PDB per kapita dan nilai tambah industri memiliki hubungan jangka panjang dengan emisi CO_2 total.

Pada jangka pendek, hasil MG menunjukkan bahwa hanya perubahan X4 yang signifikan pada tingkat 10%, sedangkan variabel lainnya tidak signifikan. Berbeda dengan hasil tersebut, estimasi PMG menunjukkan bahwa hanya perubahan X1 yang memiliki hubungan positif dan signifikan terhadap emisi CO_2 total. Oleh karena PMG merupakan estimator terpilih, hasil utama menunjukkan bahwa perubahan PDB per kapita merupakan satu-satunya variabel yang memiliki hubungan jangka pendek signifikan dengan emisi CO_2 total.

Pada pengujian ECT, hasil MG menunjukkan koefisien negatif dan signifikan, yang mengindikasikan adanya mekanisme penyesuaian menuju keseimbangan jangka panjang. Sebaliknya, hasil PMG menunjukkan koefisien negatif tetapi tidak signifikan. Dengan demikian, berdasarkan estimator PMG yang terpilih, mekanisme penyesuaian menuju keseimbangan jangka panjang belum terbukti secara statistik. Hasil MG tetap disajikan sebagai pembanding yang menunjukkan adanya perbedaan mekanisme penyesuaian antar-estimator.

4.4. Pembahasan Umum

Hasil kedua model menunjukkan bahwa hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan Y pada negara berkembang Asia belum sepenuhnya mengikuti pola EKC. Pada Model 1, koefisien jangka panjang X1 bernilai positif dan X2 bernilai negatif, tetapi keduanya tidak signifikan secara statistik berdasarkan estimator MG yang terpilih. Dengan demikian, penelitian ini tidak menemukan dukungan statistik yang memadai bagi pola U terbalik dalam spesifikasi dan sampel yang dianalisis. Pada Model 2, X1 memiliki hubungan positif dan signifikan dalam jangka panjang berdasarkan estimator PMG, tetapi ECT tidak signifikan sehingga mekanisme penyesuaian menuju keseimbangan jangka panjang belum terkonfirmasi.

Hubungan positif X1 pada Model 2 mengindikasikan bahwa peningkatan PDB per kapita berkaitan dengan peningkatan Y dalam jangka panjang pada sampel penelitian. Temuan ini dapat mencerminkan bahwa pertumbuhan pendapatan masih berjalan bersama peningkatan aktivitas ekonomi dan kebutuhan energi. Namun, model ini tidak secara langsung mengidentifikasi sumber energi, efisiensi produksi, atau komposisi sektoral yang menjadi saluran hubungan tersebut. Oleh karena itu, penjelasan mengenai peran energi dan struktur produksi ditempatkan sebagai kemungkinan mekanisme, bukan sebagai temuan yang telah diuji.

Di sisi lain, hasil X3, X4, dan X5 menunjukkan bahwa faktor struktural memiliki karakteristik yang berbeda. X3 dan X5 tidak menunjukkan hubungan signifikan, sedangkan X4 memiliki hubungan negatif pada tingkat signifikansi 10% dalam jangka panjang. Perbedaan tersebut memperlihatkan bahwa pengaruh terhadap Y tidak dapat dijelaskan hanya melalui pertumbuhan ekonomi, tetapi juga berkaitan dengan struktur produksi, investasi, dan perubahan demografis.

Secara keseluruhan, hasil penelitian belum menunjukkan adanya turning point EKC yang dapat menjadi indikasi bahwa peningkatan pendapatan secara otomatis akan diikuti oleh penurunan emisi. Temuan ini menjadi penting karena menunjukkan bahwa pencapaian pertumbuhan ekonomi yang lebih tinggi belum dengan sendirinya menjamin terjadinya perbaikan lingkungan pada negara berkembang Asia.

5. Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan menganalisis hubungan pertumbuhan ekonomi dan emisi karbon serta menguji keberlakuan Environmental Kuznets Curve (EKC) pada 16 negara berkembang di Asia selama periode 2002–2024. Analisis dilakukan melalui dua model menggunakan pendekatan Panel ARDL dengan pemilihan estimator berdasarkan Hausman Test. Model 1 menggunakan MG, sedangkan Model 2 menggunakan PMG.

Hasil Model 1 menunjukkan bahwa EKC belum terbukti pada negara-negara yang diamati. X1 memiliki koefisien positif, sedangkan X2 memiliki koefisien negatif, tetapi keduanya tidak signifikan secara statistik. Dengan demikian, pola hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan Y belum menunjukkan bukti adanya turning point sebagaimana diprediksikan oleh EKC. Dalam jangka pendek, X1 dan X2 juga tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan. Meskipun demikian, koefisien ECT yang negatif dan signifikan menunjukkan adanya mekanisme penyesuaian menuju keseimbangan jangka panjang pada Model 1.

Pada Model 2, X1 menunjukkan hubungan positif dan signifikan terhadap Y baik dalam jangka panjang maupun jangka pendek. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan aktivitas ekonomi pada negara sampel masih berjalan bersamaan dengan peningkatan tekanan lingkungan. X3 tidak menunjukkan hubungan yang signifikan terhadap Y, sehingga penelitian ini belum memberikan bukti yang cukup untuk mendukung Pollution Haven Hypothesis maupun Pollution Halo Hypothesis. X4 memiliki hubungan negatif dan signifikan pada tingkat 10% dalam jangka panjang, sedangkan X5 tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan. X6 juga tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap Y. Selain itu, ECT Model 2 tidak signifikan sehingga belum terdapat bukti statistik mengenai mekanisme penyesuaian menuju keseimbangan jangka panjang.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi di negara berkembang Asia belum menunjukkan proses decoupling yang cukup kuat untuk menghasilkan pola EKC. Oleh karena itu, peningkatan pendapatan perlu disertai perubahan struktur produksi, peningkatan efisiensi, penggunaan teknologi yang lebih bersih, dan kebijakan pembangunan yang mempertimbangkan tekanan lingkungan.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, cakupan penelitian dibatasi pada 16 negara berkembang Asia yang memiliki ketersediaan data yang memadai selama periode 2002–2024. Dengan demikian, hasil penelitian tidak secara langsung dapat digeneralisasikan kepada seluruh negara Asia maupun kawasan berkembang lainnya. Pemilihan sampel tersebut dilakukan untuk mempertahankan keseimbangan panel dan konsistensi estimasi.

Kedua, penelitian menggunakan beberapa indikator makroekonomi dan struktural sehingga belum mencakup seluruh faktor yang berpotensi memengaruhi Y, seperti konsumsi energi berdasarkan sumber energi, kualitas institusi, kebijakan lingkungan, perdagangan internasional, dan perkembangan teknologi. Penelitian selanjutnya dapat memperluas cakupan variabel tersebut untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme yang memengaruhi emisi.

Ketiga, penggunaan data tahunan belum sepenuhnya menangkap perbedaan respons setiap negara terhadap guncangan tertentu, termasuk pandemi COVID-19. Penelitian berikutnya dapat mempertimbangkan pendekatan yang memungkinkan pengujian heterogenitas negara secara lebih mendalam, structural break, maupun perbedaan karakteristik berdasarkan tingkat pendapatan dan struktur ekonomi.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan selama proses penelitian, baik dalam penyediaan data, pengolahan dan analisis, maupun dalam memberikan masukan terhadap penyusunan artikel. Apresiasi juga disampaikan kepada institusi akademik dan pihak lain yang telah mendukung terselesaikannya penelitian ini.

Referensi

Benzerrouk, Z., Abid, M., & Sekrafi, H. (2021). Pollution haven or halo effect? A comparative analysis of developing and developed countries. Energy Reports, 7, 4862–4871. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.076

Breusch, T. S., & Pagan, A. R. (1980). The Lagrange multiplier test and its applications to model specification in econometrics. The Review of Economic Studies, 47(1), 239–253. https://doi.org/10.2307/2297111

Cole, M. A., Elliott, R. J. R., & Fredriksson, P. G. (2006). Endogenous pollution havens: Does FDI influence environmental regulations? Scandinavian Journal of Economics, 108(1), 157–178. https://doi.org/10.1111/j.1467-9442.2006.00439.x

Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (2004). Trade, growth, and the environment. Journal of Economic Literature, 42(1), 7–71. https://doi.org/10.1257/002205104773558047

de Bruyn, S. M., van den Bergh, J. C. J. M., & Opschoor, J. B. (1998). Economic growth and emissions: Reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curves. Ecological Economics, 25(2), 161–175. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00178-X

Engle, R. F., & Granger, C. W. J. (1987). Co-integration and error correction: Representation, estimation, and testing. Econometrica, 55(2), 251–276. https://doi.org/10.2307/1913236

Febriyanto, M., et al. (2024). FDI and CO_2 emissions in ASEAN: Evidence from a panel data approach 1990–2020. Innovation and Green Development, 3, 100181. https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100181

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement (NBER Working Paper No. 3914). National Bureau of Economic Research. https://doi.org/10.3386/w3914

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. Quarterly Journal of Economics, 110(2), 353–377. https://doi.org/10.2307/2118443

Handoyo, R. D., Munawar, W., Dartanto, T., & Purwono, R. (2022). Environmental Kuznets Curve and Pollution Haven Hypothesis in Asia. International Journal of Energy Economics and Policy, 12(4), 385–393. https://doi.org/10.32479/ijeep.13242

Im, K. S., Pesaran, M. H., & Shin, Y. (2003). Testing for unit roots in heterogeneous panels. Journal of Econometrics, 115(1), 53–74. https://doi.org/10.1016/S0304-4076(03)00092-7

Iskandar, A. (2019). Hubungan pertumbuhan ekonomi dan emisi CO_2 di Indonesia: Pengujian hipotesis Environmental Kuznets Curve dengan pendekatan ARDL. Jurnal BPPK, 12(1), 42–52. https://doi.org/10.48108/jurnalbppk.v12i1.369

Leonardo, D., Maulana, M., & Hartanto, J. (2023). Impact of economic growth and FDI on Indonesia environmental degradation: EKC and pollution hypothesis testing. Jurnal Ekonomi Pembangunan, 21(1), 15–30. https://doi.org/10.22219/jep.v21i01.24294

Massagony, A., & Budiono. (2022). Is the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis valid on CO_2 emissions in Indonesia? International Journal of Environmental Studies. https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2029097

Narayan, P. K., & Narayan, S. (2010). Carbon dioxide emissions and economic growth: Panel data evidence from developing countries. Energy Policy, 38(1), 661–666. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.005

Pedroni, P. (1999). Critical values for cointegration tests in heterogeneous panels with multiple regressors. Oxford Bulletin of Economics and Statistics, 61(S1), 653–670. https://doi.org/10.1111/1468-0084.0610s1653

Pesaran, M. H., Shin, Y., & Smith, R. P. (1999). Pooled mean group estimation of dynamic heterogeneous panels. Journal of the American Statistical Association, 94(446), 621–634. https://doi.org/10.1080/01621459.1999.10474156

Polloni-Silva, E., Ferraz, D., Camioto, F. de C., Rebelatto, D. A. do N., & Moralles, H. F. (2021). Environmental Kuznets Curve and the Pollution-Halo/Haven Hypotheses: An Investigation in Brazilian Municipalities. Sustainability, 13(8), 4114. https://doi.org/10.3390/su13084114

Rodrik, D. (2016). Premature deindustrialization. Journal of Economic Growth, 21(1), 1–33. https://doi.org/10.1007/s10887-015-9122-3

Rostow, W. W. (1960). The stages of economic growth: A non-communist manifesto. Cambridge University Press.

Setiawan, A., & Anwar, S. (2022). Environmental Kuznets Curve hypothesis in Indonesia: Evidence from VECM approach. JEJAK: Jurnal Ekonomi dan Kebijakan, 15(1), 1–18. https://doi.org/10.15294/jejak.v15i1.33040