

PENGARUH KOMPLEKSITAS EKONOMI TERHADAP EMISI KARBON DIOKSIDA DI NEGARA G20: ENVIRONMENTAL KUZNETS CURVE (EKC)

Muhammad Iqbal Al Qodri¹⁾, Widyastutik²⁾, Eisha Maghfiruha Rachbini³⁾,

Institut Pertanian Bogor

Email: ¹m_iqbalalqodri@apps.ipb.ac.id, ²widyastutik@apps.ipb.ac.id,
³eisha_mr@apps.ipb.ac.id

ABSTRACT

Economic growth not only increases the size of the economy, but also the variety of technology used in production, which are captured by the Economic Complexity Index (ECI) approach. Many countries seek to increase its economic complexity through the industrial sector to accelerate economic growth. On the other hand, energy sources from coal and petroleum so resulting in high emissions. The objective of this study is to analyze whether economic complexity can reduce emissions by using the Environmental Kuznets Curve (EKC) approach. The research method used are Fully Modified OLS (FMOLS) and Dynamic OLS (DOLS) for 18 selected G20 countries from 1995-2020. This study found that economic complexity reduced carbon dioxide emissions after passing the turning point in the long run, in the case of both developed and developing G20 countries. In addition, for developed G20 countries that FDI and renewable energy contributed to reduce emissions. However, for developing G20 countries that FDI and renewable energy increased carbon dioxide emissions. This study suggested that low emissions technology innovation need to be optimized through FDI, for developed G20 countries. Furthermore, for developing G20 countries, strengthening G20 cooperation for energy transition, particularly in low emission investment financing, is needed.

Keywords: carbon dioxide, economic complexity, EKC, FDI, renewable energy

ABSTRAK

Pertumbuhan ekonomi tidak hanya meningkatkan ukuran ekonomi, tetapi juga variasi teknologi yang digunakan dalam produksi, indikator tersebut ditangkap oleh *Economic Complexity Index* (ECI). Setiap negara berusaha meningkatkan kompleksitas ekonominya melalui sektor industri untuk mengakselerasi pertumbuhan ekonomi. Di sisi lain, sumber energi berasal dari batu bara dan minyak bumi sehingga menghasilkan emisi yang tinggi. Tujuan penelitian untuk menganalisis apakah

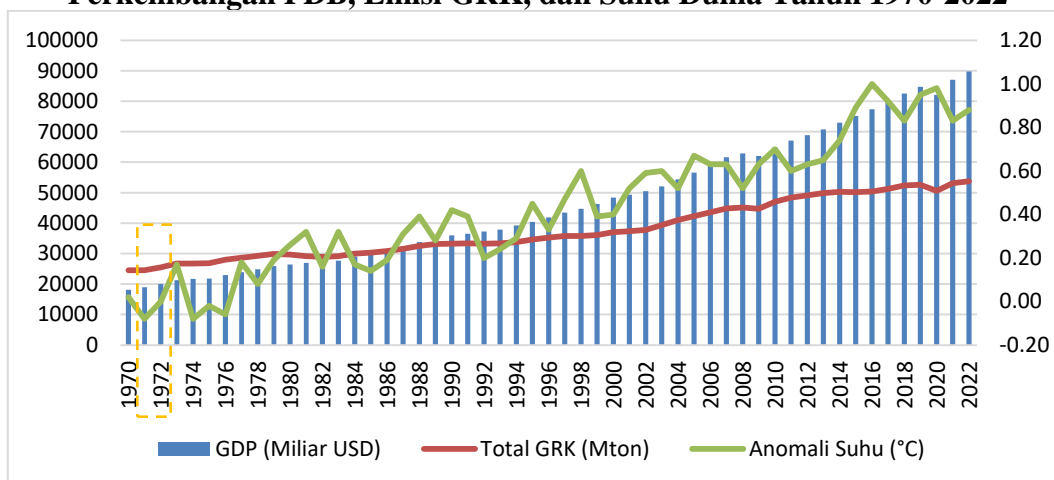
kompleksitas ekonomi dapat menurunkan emisi dengan menggunakan pendekatan *Environmental Kuznets Curve* (EKC). Metode penelitian yang digunakan adalah *Fully Modified OLS* (FMOLS) dan *Dynamic OLS* (DOLS) untuk 18 negara G20 terpilih dari tahun 1995-2020. Hasil penelitian bahwa kompleksitas ekonomi dapat menurunkan emisi karbon dioksida setelah melewati titik balik dalam jangka panjang, baik untuk negara maju maupun berkembang G20. Selain itu, untuk negara maju G20, FDI dan energi terbarukan berkontribusi dalam mengurangi emisi. Namun, negara berkembang G20, FDI dan energi terbarukan justru meningkatkan emisi karbon dioksida. Studi ini menyarankan bahwa inovasi teknologi rendah emisi perlu dioptimalkan melalui FDI untuk negara maju G20. Selain itu, negara berkembang G20, perlu memperkuat kerja sama transisi energi G20, khususnya pembiayaan investasi rendah emisi.

Kata Kunci: karbon dioksida, kompleksitas ekonomi, EKC, FDI, energi terbaruka

PENDAHULUAN

Pemanfaatan kelimpahan sumber daya di setiap negara bertujuan untuk meningkatkan taraf hidup dan kesejahteraan masyarakat. Fenomena pembangunan ekonomi tidak hanya meningkatkan ukuran ekonomi yang diukur melalui Produk Domestik Bruto (PDB), tetapi juga meningkatkan sumber daya manusia dan variasi teknologi dalam produksi, kapabilitas tersebut ditangkap melalui pendekatan *Economic Complexity Index* (ECI) (Hoeriyah et al., 2022). ECI merupakan indeks pembangunan ekonomi berbasis produk karena mengukur pengetahuan masyarakat dalam menghasilkan produk ekspor tertentu (Nababan, 2013). Proses pembangunan ekonomi tidak terlepas dari adanya eksternalitas negatif seperti emisi karbon dioksida (CO₂).

Gambar 1
Perkembangan PDB, Emisi GRK, dan Suhu Dunia Tahun 1970-2022



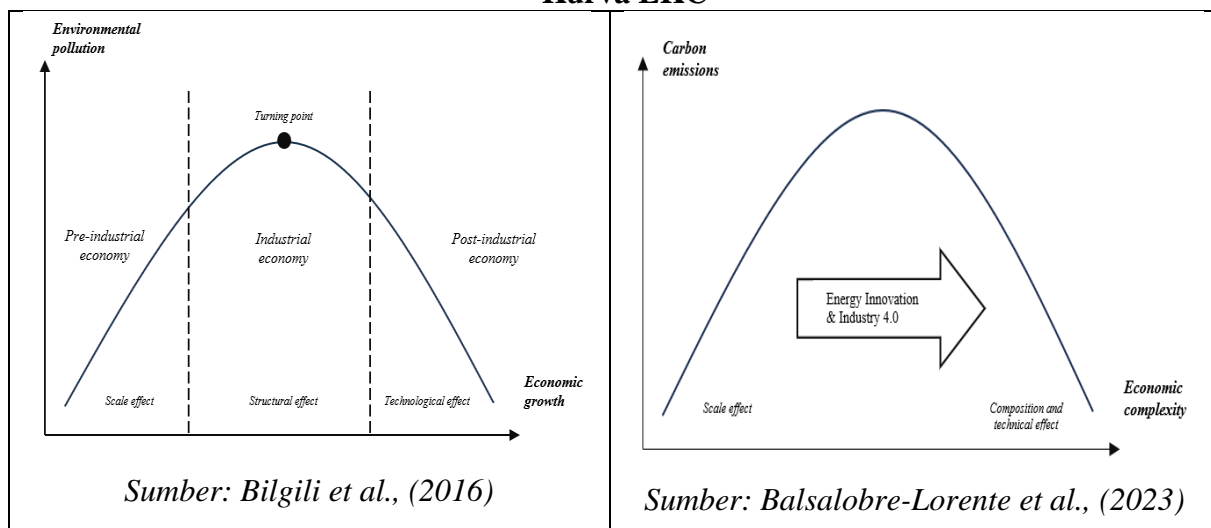
Sumber: EDGAR dan UNEP, 2023

Berdasarkan data EDGAR (*Emissions Database for Global Atmospheric Research*) dan UNEP (*UN Environment Programme*) pada Gambar 1, kenaikan PDB sejalan dengan kenaikan total emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang merupakan gabungan emisi CO₂, CH₄, N₂O. Secara global emisi GRK tahun 2022 sebesar 53786,04 Mt atau mengalami peningkatan 1,37 persen dibandingkan tahun 2021, dengan sektor kontribusi emisi CO₂ terbesar adalah industri energi sebesar 14669,3 Mt. Penyebab kenaikan bersamaan antara GRK dan PDB dikarenakan ekspansi industri yang mendorong ketergantungan berlebihan pada bahan bakar fosil, sehingga meningkatkan emisi secara signifikan (Zhao et al., 2021).

Selain itu, ekspansi industri juga turut mendorong peningkatan kompleksitas ekonomi karena mencerminkan pengetahuan dan struktur produktifnya (Hausmann et al., 2013).

Adanya peningkatan kompleksitas ekonomi menunjukkan kapasitas untuk memproduksi dan mengekspor produk kompleks dan bernilai tambah tinggi (Neagu dan Teodoru, 2019), sehingga produk tersebut sulit diduplikasi oleh negara lain. Selain berdampak pada perekonomian, kompleksitas ekonomi juga berperan dalam proses tersebarnya produk dan teknologi ramah lingkungan di suatu negara (Neagu, 2019) dan daya tarik investasi (Balsalobre-Lorente et al., 2023). Namun demikian, nyatanya jika ditinjau berdasarkan negara kontributor >1% terhadap emisi GRK dunia terdapat 16 negara, dengan 14 negara di antaranya anggota G20. *Group of Twenty* (G20) adalah forum kerja sama mencakup 19 negara dan Uni Eropa yang bertujuan mewujudkan pertumbuhan global berkelanjutan dan inklusif yang merepresentasikan 85% perekonomian dunia dengan andil 75% emisi GRK global.

Gambar 2
Kurva EKC



Berdasarkan Neagu (2019) dan Balsalobre-Lorente et al., (2023) kompleksitas ekonomi dapat menurunkan emisi karbon dioksida di Uni Eropa dan BRICS karena mendorong adopsi teknologi dan inovasi ramah lingkungan dalam kerangka pendekatan *Environmental Kuznets Curve* (EKC). Teori EKC dikemukakan oleh Kuznets tahun 1955 (Gambar 2), bahwa kualitas lingkungan akan memburuk pada awal perkembangan ekonomi, kemudian membaik setelah melampaui titik balik (*turning point*) tertentu (Huang et al., 2021). Titik balik menjadi poin penting karena dapat mengetahui gambaran apabila negara tersebut telah mencapai atau melewati nilai tersebut dimana titik tersebut seharusnya degradasi lingkungan akan menurun.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan terdapat pertentangan, bahwa ketika ECI meningkat maka seharusnya adopsi teknologi ramah lingkungan turut meningkat dan emisi mulai menurun. Pada kondisi G20, ECI mengalami peningkatan namun belum mengindikasikan penurunan emisi. Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi titik balik (*turning point*) kompleksitas ekonomi terhadap emisi karbon dioksida pada negara G20, dengan judul: **“PENGARUH KOMPLEKSITAS EKONOMI TERHADAP EMISI KARBON DIOKSIDA DI NEGARA G20: ENVIRONMENTAL KUZNETS CURVE (EKC)”**.

METODE PENELITIAN

Jenis dan Sumber Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang bersumber dari *The Emissions Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR), *World Development Indicators* (WDI), *Observatory of Economic Complexity* (OEC), dan *U.S. Energy Information Administration* (EIA). Data observasi adalah data tahunan (annually time series) dari 1995-2020 dari 18 negara anggota G20 yang diklasifikasikan menjadi kelompok negara berkembang (*developing countries*) yaitu: Argentina, Brazil, China, India, Indonesia, Meksiko, Rusia, Afrika Selatan, dan Turki. Sedangkan kelompok negara maju (*developed countries*) yakni: Australia, Kanada, Prancis, Jerman, Italia, Jepang, Korea Selatan, Inggris, dan Amerika Serikat (IMF, 2023). Pengolahan menggunakan software Microsoft Excel dan EViews 12 dengan rincian Tabel 1.

Tabel 1
Variabel dan Sumber Data Penelitian

Variabel	Simbol	Satuan	Sumber	Referensi
Emisi karbon dioksida (CO ₂)	CARBON	Kilo ton (kt)	WDI	(Hasan et al., 2023)
Indeks kompleksitas ekonomi pendekatan perdagangan	ECI	Indeks	OEC	(Balsalobre-Lorente et al., 2023)
Indeks kompleksitas ekonomi pendekatan perdagangan kuadratik	ECI_SQ	Indeks	OEC	(Balsalobre-Lorente et al., 2023)
Total konsumsi energi terbarukan	REW	Quad Btu	EIA	(Ye et al., 2023)
<i>Foreign Direct Investment</i>	FDI	Persen	WDI	(Saqib dan Dinca, 2023)

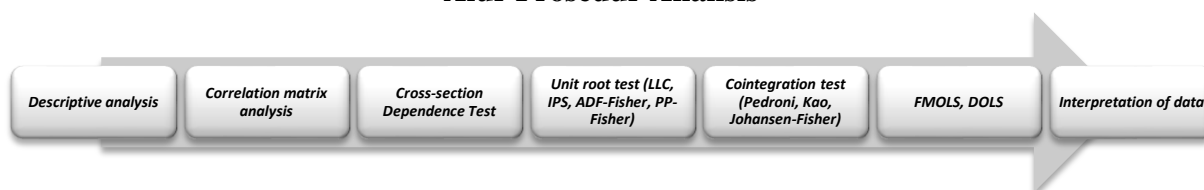
Metode Analisis

Penelitian ini menggunakan metode analisis berupa data panel kointegrasi yaitu *Fully Modified OLS* (FMOLS) dan *Dynamic OLS* (DOLS) yang bertujuan untuk memperkirakan hubungan antar variabel dalam jangka panjang. FMOLS dikembangkan oleh Phillips dan Hansen pada tahun 1990 untuk mendapatkan hasil estimator yang tidak bias dari regresi kointegrasi. Seringkali hasil metode *Ordinary Least Square* (OLS) bahwa seringkali diperoleh hasil dugaan yang bias dan tidak konsisten dalam analisis panel kointegrasi. FMOLS adalah pendekatan non-parametrik yang digunakan untuk mengontrol efek individu (endogenitas) serta masalah korelasi serial. Sedangkan, metode DOLS mampu mengoreksi masalah heteroskedastisitas dan autokorelasi serta lebih konsisten dibandingkan dengan metode OLS biasa, serta mampu menghilangkan masalah bias sampel yang kecil (Kao dan Chiang, 2001).

Sebelum dapat melakukan analisis metode FMOLS dan DOLS perlu melakukan beberapa uji dan syarat yang harus dipenuhi (Gambar 3), di antaranya: (1) Uji Matriks Korelasi, bertujuan untuk mengidentifikasi masalah multikolinearitas; (2) Uji *Cross-Sectional*

Dependence (CSD), bertujuan untuk mengidentifikasi gangguan regresi data panel, apakah berkorelasi atau bergantung secara *cross sectional*, apakah bersifat lemah, sedang, cukup kuat, dan kuat (Elhorst et al., 2021); (3) Uji Stasioneritas, bertujuan untuk menghindari regresi semu atau *spurious regression*. Uji ini menjadi syarat yang harus dipenuhi (*precondition*) bahwa semua variabel tidak stasioner pada level, namun semua variabel harus stasioner pada *first difference*; dan (4) Uji Kointegrasi, bertujuan untuk mengukur dampak jangka panjang dan korelasi non-stasioner antar variabel, serta juga menjadi syarat harus dipenuhi.

Gambar 3
Alur Prosedur Analisis



Spesifikasi Model Penelitian

Penelitian menggunakan model logaritma kuadratik yang digunakan untuk menguji hipotesis EKC antara indeks kompleksitas ekonomi terhadap emisi gas rumah kaca (Grossman dan Krueger, 1991) dengan persamaan awal sebagai berikut:

$$E = f(Y, Y^2, Z) \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan: E adalah proksi pencemaran lingkungan; Y adalah pendapatan; Y^2 adalah pendapatan secara kuadrat; dan Z adalah faktor-faktor lain yang mempengaruhi lingkungan. Kemudian, variabel tersebut dimodifikasi sesuai kebutuhan penelitian dengan mengadopsi model penelitian Balsalobre-Lorente et al., (2023) sebagai persamaan (2) dan (3) berikut:

$$CARBON = f(ECI, ECI^2, REW, FDI) \dots\dots\dots (2)$$

$$LN_CARBON_{it} = \beta_0 + \beta_1 ECI_{it} + \beta_2 ECI_{it}^2 + \beta_3 LN_REW_{it} + \beta_4 FDI_{it} + \varepsilon_{it} \dots\dots\dots (3)$$

Kemudian, untuk menghitung nilai titik balik menggunakan persamaan (4) secara matematis melalui derivatif pertama dari persamaan kuadratik (Jebli et al., 2022) sebagai berikut.

$$ECI_{it} = \frac{-\beta_1}{2\beta_2}, \beta_2 < 0 \dots\dots\dots (4)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Pra-Estimasi

1. Hasil Uji Matriks Korelasi

Berdasarkan Tabel 2, koefisien matriks untuk seluruh variabel penelitian baik di kategori *full sample*, *developed*, dan *developing countries* memiliki nilai kurang dari 0,8 artinya tidak terdapat multikolinearitas. Meskipun demikian, terdapat nilai koefisien matriks yang melebihi 0,8 pada variabel ECI dan ECI_SQ. Menurut Balsalobre-Lorente et al., (2023), kedua variabel tersebut terindikasi multikolinearitas tetapi tidak mempengaruhi kapasitas estimasi dari model atau statistik pada *goodness of fit*.

Tabel 2
Hasil Uji Matriks Korelasi

Description	LN_CARBON	ECI	ECI_SQ	LN_REW	FDI
LN_CARBON	1.000				
ECI	0.319	1.000			
ECI_SQ	0.265	0.930	1.000		
LN_REW	0.678	0.544	0.400	1.000	
FDI	0.019	-0.064	-0.128	0.069	1.000

2. Hasil Uji Cross-Sectional Dependence (CSD)

Berdasarkan Tabel 3, seluruh data penelitian memiliki nilai probabilitas (*p-value*) sebesar 0,000 atau kurang dari taraf nyata 1%. Hal ini mengindikasikan bahwa variabel tersebut berpengaruh di seluruh negara dalam jangka panjang dan setiap perubahan yang tidak terduga dalam fenomena sosial, lingkungan, dan ekonomi di salah satu negara G20 nampaknya akan menyebar ke negara anggota lainnya.

Tabel 3
Hasil Uji CSD

Description	Statistics	P-Value
Breusch Pagan LM	1196.238	0.000
Pesaran scaled LM	59.638	0.000
Pesaran CD	9.674	0.000

3. Hasil Uji Stasioneritas

Berdasarkan Tabel 4, variabel-variabel data penelitian kategori *full sample, developed*, dan *developing countries* tidak stasioner pada level, namun telah stasioner pada first *difference*, sehingga semua variabel telah stasioner pada derajat yang sama. Setelah syarat ini dipenuhi, perlu dilakukan uji kointegrasi.

Tabel 4
Hasil Uji Stasioneritas

Description	Level		First Difference	
	Statistic	p-value	Statistic	p-value
Method	LN_CARBON		D(LN_CARBON)	
Levin, Lin & Chu	-2.362***	0.009	-9.830***	0.000
Im, Pesaran and Shin	2.558	0.995	-10.696***	0.000
ADF - Fisher	38.562	0.355	182.139***	0.000
PP - Fisher	45.185	0.140	191.192***	0.000
Method	ECI		D(ECI)	
Levin, Lin & Chu	-2.201**	0.014	-16.004***	0.000
Im, Pesaran and Shin	0.500	0.692	-14.997***	0.000
ADF - Fisher	31.087	0.701	252.395***	0.000
PP - Fisher	31.511	0.682	261.306***	0.000
Method	ECI_SQ		D(ECI_SQ)	
Levin, Lin & Chu	-0.117	0.453	-15.189***	0.000
Im, Pesaran and Shin	-0.149	0.441	-15.307***	0.000
ADF - Fisher	45.180	0.140	259.747***	0.000
PP - Fisher	31.477	0.684	274.299***	0.000
Method	LN_REW		D(LN_REW)	
Levin, Lin & Chu	0.112	0.545	-19.856***	0.000
Im, Pesaran and Shin	1.668	0.952	-18.614***	0.000
ADF - Fisher	36.039	0.467	311.067***	0.000
PP - Fisher	41.852	0.232	329.714***	0.000
Method	FDI		D(FDI)	

Description	Level		First Difference	
	Statistic	p-value	Statistic	p-value
Levin, Lin & Chu	-5.392***	0.000	-15.226***	0.000
Im, Pesaran and Shin	-8.083***	0.000	-18.921***	0.000
ADF - Fisher	142.161***	0.000	324.678***	0.000
PP - Fisher	132.872***	0.000	336.298***	0.000

Keterangan: *), **), ***) signifikan pada taraf nyata 10%, 5%, 1%
 Sumber: EViews 12 (diolah)

4. Hasil Uji Kointegrasi

Berdasarkan Tabel 5, bahwa untuk data penelitian kategori *full sample*, *developed*, dan *developing countries* terbukti memiliki hubungan jangka panjang pada model karena memiliki probabilitas kurang dari taraf nyata, sehingga dapat disimpulkan terdapat kointegrasi antara variabel emisi dengan minimal satu variabel penjelas dalam model penelitian.

Tabel 5
Hasil Uji Kointegrasi

Description	Full Sample	Developed Countries	Developing Countries
Pedroni			
Panel v Statistic	-1.486 (0.931)	1.123 (0.131)	4.546*** (0.000)
Panel rho Statistic	2.411 (0.992)	1.760 (0.961)	1.532 (0.937)
Panel PP Statistic	0.713 (0.762)	-0.289 (0.386)	-0.228 (0.410)
Panel ADF Statistic	0.715 (0.763)	-0.787 (0.216)	-1.784** (0.037)
Group rho Statistic	2.689 (0.996)	2.364 (0.991)	2.553 (0.995)
Group PP Statistic	-1.647** (0.050)	-0.491 (0.312)	-1.399* (0.081)
Group ADF Statistic	-2.260** (0.012)	-1.513* (0.065)	-3.236*** (0.001)
Kao			
ADF	-0.653 (0.257)	0.537 (0.296)	-2.720*** (0.003)

Keterangan: *), **), ***) signifikan pada taraf nyata 10%, 5%, 1%
 Sumber: EViews 12 (diolah)

Hasil Estimasi FMOLS dan DOLS

Setelah terpenuhinya hasil uji stasioneritas dan uji kointegrasi bahwa variabel dalam penelitian memiliki hubungan kointegrasi jangka panjang, maka metode panel kointegrasi yaitu *Full Modified Ordinary Least Square* (FMOLS) dan *Dynamic Ordinary Least Square* (DOLS) dapat digunakan, dengan hasil pada Tabel 6 sebagai berikut.

Tabel 6
Hasil Uji Kointegrasi

Dependent variable: LN_CARBON	Full Sample	Developed Countries	Developing Countries
Panel FMOLS			
ECI	0,2841*** (0,0000)	0,9561*** (0,0000)	0,1846*** (0,0000)
ECL_SQ	-0,1288*** (0,0001)	-0,3758*** (0,0000)	-0,2858*** (0,0000)

Dependent variable: LN_CARBON	Full Sample	Developed Countries	Developing Countries
LN_REW	-0,1617*** (0,0000)	-0,1903*** (0,0000)	0,6111*** (0,0000)
FDI	0,070802 (0,1631)	-0,2008*** (0,0081)	-0,0156 (0,7323)
R-squared	0,9878	0,8177	0,9855
Adj. R-squared	0,9867	0,7989	0,9847
Panel DOLS			
ECI	0,2281*** (0,0148)	0,3382*** (0,0050)	0,3892*** (0,0001)
ECI_SQ	-0,1661*** (0,0042)	-0,0268 (0,4436)	-0,1892** (0,0301)
LN_REW	-0,1486*** (0,0001)	-0,1536*** (0,0000)	0,0790 (0,2850)
FDI	-0,0015 (0,7822)	-0,0029 (0,4100)	0,0339*** (0,0000)
R-squared	0,9998	0,9995	0,9995
Adj. R-squared	0,9987	0,9985	0,9984

Keterangan: *), **), ***) signifikan pada taraf nyata 10%, 5%, 1%

Sumber: EViews 12 (diolah)

Interpretasi Hasil

1. Pengaruh Kompleksitas Ekonomi terhadap Emisi Karbon

Pengaruh ECI dan ECI kuadratik terhadap emisi karbon dioksida (CARBON) pada kategori *full sample* secara FMOLS dan DOLS untuk koefisien ECI bernilai positif (0,2841; 0,2281) dan koefisien ECI kuadratik bernilai negatif (-0,1288; -0,1661) dengan memiliki signifikansi pada taraf nyata 1%. Namun, hasil untuk negara maju hanya terbukti secara FMOLS sedangkan negara berkembang terbukti secara FMOLS dan DOLS. Hasil pada kategori *full sample*, *developed*, dan *developing countries* secara konsisten menunjukkan bahwa adanya pengaruh jangka panjang dalam menurunkan emisi dan terindikasi memiliki kurva berbentuk U terbalik. Menurut Neagu (2019) dan Balsalobre-Lorente et al., (2023) bahwa pengaruh ECI pada tahap awal pembangunan akan meningkatkan emisi, kemudian setelah melewati titik balik tertentu, ECI akan bergeser pada pola produksi yang efektif dan efisien sehingga mampu menciptakan produk kompleks menggunakan teknologi tinggi dan rendah emisi.

2. Pengaruh Kompleksitas Ekonomi terhadap Emisi Karbon

Pengaruh konsumsi energi terbarukan terhadap emisi karbon dioksida (CARBON) pada kategori *full sample* terbukti secara FMOLS dan DOLS dengan koefisien negatif (-0,1617; -0,1486) serta signifikan pada taraf nyata 1%. Kemudian, kategori negara maju (*developed countries*) juga terbukti secara FMOLS dan DOLS, sedangkan kategori negara berkembang (*developing countries*) terbukti secara FMOLS. Ketika pertumbuhan ekonomi suatu negara semakin tinggi maka kesadaran merestorasi lingkungan meningkat, sehingga membuat *stakeholders* dan industri memprioritaskan sumber energi terbarukan (Destek dan Sinha 2020).

3. Pengaruh Kompleksitas Ekonomi terhadap Emisi Karbon

Pengaruh FDI terhadap emisi karbon dioksida (CARBON) pada kategori *full sample* tidak signifikan karena memiliki probabilitas lebih dari taraf nyata. Kondisi berbeda ditemukan pada negara maju (*developed countries*) yang terbukti secara FMOLS memiliki koefisien sebesar -0,2008 dan signifikan pada taraf nyata 1%. Berbeda dengan kondisi negara

berkembang (*developing countries*) yang terbukti secara DOLS memiliki koefisien positif sebesar 0,0339 dan signifikan pada taraf nyata 1%. Menurut Saqib dan Dinca (2023), untuk menarik investasi energi bersih di negara maju maka dibentuklah kerja sama bilateral seperti AS dan China yaitu *Clean Energy Research Center* (CERC) untuk memfasilitasi penelitian dan pengembangan energi bersih, sehingga mendukung *Pollution Halo Hypothesis* (PHL). Disisi lain, negara berkembang justru FDI masih menyebabkan peningkatan emisi karena tingkat pendapatan negara berkembang masih rendah dan investasi dalam teknologi hijau membutuhkan biaya yang besar, sehingga negara berkembang saat ini lebih banyak berinvestasi dalam teknologi non-hijau (Lu et al., 2022).

Identifikasi Nilai Titik Balik dan Kurva EKC di Negara G20

Selanjutnya, untuk mengetahui berapa nilai titik balik ECI di negara G20 yang mulai dapat menurunkan emisi karbon dioksida, terlampir pada Tabel 7 berikut. Adapun untuk negara Indonesia, Russia, dan Turkey tidak memiliki titik balik karena pengaruh ECI tidak signifikan terhadap emisi karbon dioksida.

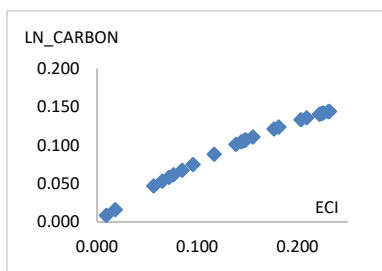
Tabel 7
Hasil Identifikasi Titik Balik (*Turning Point*) Secara Matematis

Description	ECI Coefficient	ECI_SQ Coefficient	Turning Point Mathematics*	ECI Values in 2020
Argentina	0,891	-1,163	0,383	-0,191
Australia	0,158	-0,204	0,388	-0,558
Brazil	2,876	-2,860	0,503	0,199
Canada	0,958	-0,590	0,812	0,500
China	0,523	-0,169	1,551	1,200
France	17,166	-5,799	1,480	1,338
Germany	15,052	-3,935	1,913	1,932
India	0,705	-1,618	0,218	0,494
Indonesia	n/a	n/a	EKC tidak terbukti	-0,056
Italy	19,431	-7,386	1,315	1,293
Japan	12,533	-2,792	2,245	2,382
South Korea	0,725	-0,321	1,128	2,117
Mexico	1,539	-0,794	0,969	0,986
Russia	n/a	n/a	EKC tidak terbukti	0,170
South Africa	2,795	-10,183	0,137	0,003
Turkey	n/a	n/a	EKC tidak terbukti	0,603
UK	14,470	-3,966	1,824	1,596
USA	21,652	-6,985	1,550	1,431

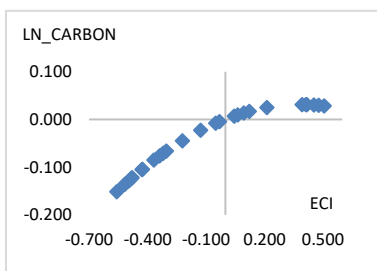
Keterangan: n/a (*not available*), (*) *turning point* dihitung menggunakan rumus persamaan (4)

Berikutnya untuk memberikan pemahaman secara grafis, maka terlampir pada Gambar 4 dengan informasi yang dapat diperoleh bahwa untuk negara Argentina, China, dan Inggris tidak memiliki titik balik karena kurvanya berbentuk linier. Namun hasil sesuai pendekatan EKC dengan bentuk kurva U terbalik ditemukan di negara Australia, Brazil, Kanada, Prancis, Jerman, India, Italia, Jepang, Korea Selatan, Meksiko, Afrika Selatan, dan Amerika Serikat.

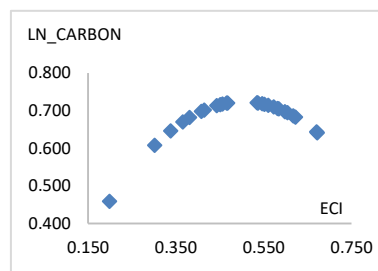
Gambar 4
Hasil Identifikasi Kurva EKC dan Titik Balik (*Turning Point*) Secara Grafis



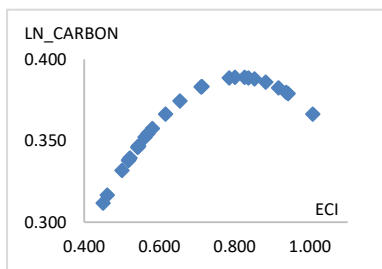
Argentina (Turning point does not yet exist)



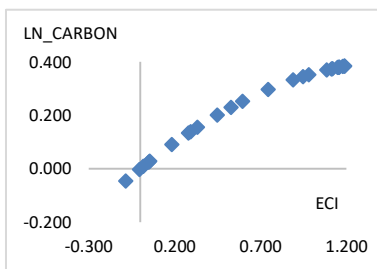
Australia (Turning point in curve by 0.413)



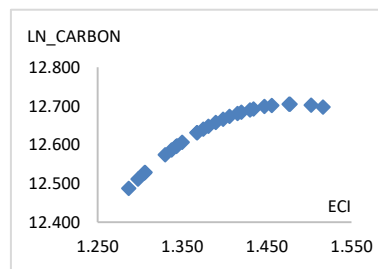
Brazil (Turning point in curve by 0.538)



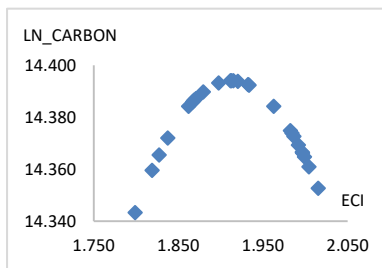
Canada (Turning point in curve by 0.827)



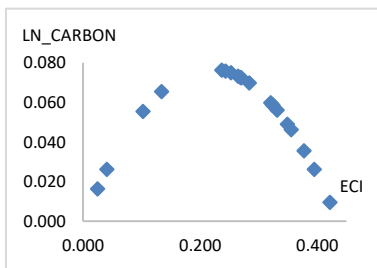
China (Turning point does not yet exist)



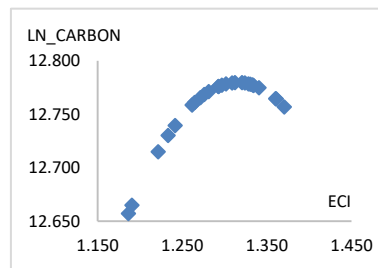
France (Turning point in curve by 1.476)



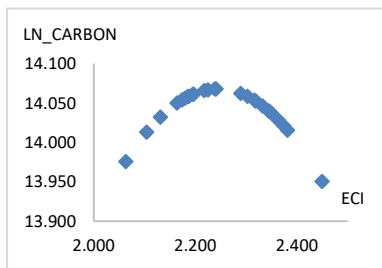
Germany (Turning point in curve by 1.92)



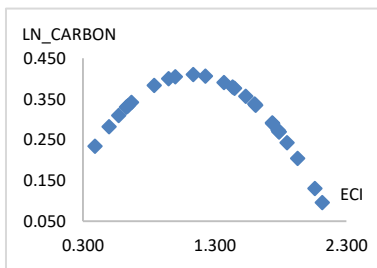
India (Turning point in curve by 0.244)



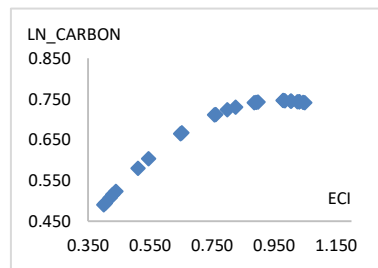
Italy (Turning point in curve by 1.312)



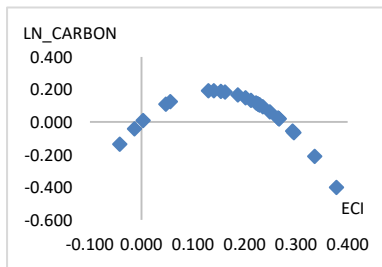
Japan (Turning point in curve by 2.241)



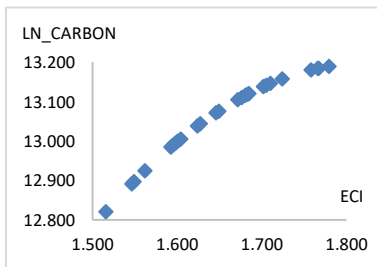
South Korea (Turning point in curve by 1.137)



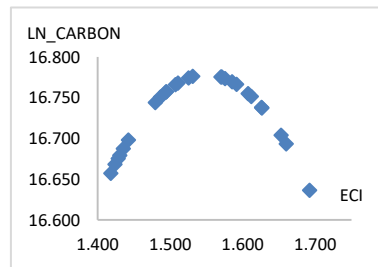
Mexico (Turning point in curve by 0.986)



South Africa (Turning point in curve by 0.14)



UK (Turning point does not yet exist)



USA (Turning point in curve by 1.531)

Sumber: Microsoft Excel (diolah)

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian menggunakan metode panel kointegrasi yang menganalisis hubungan ECI terhadap emisi karbon dioksida dalam model EKC pada 18 negara G20 diperoleh simpulan bahwa terdapat hubungan jangka panjang antar variabel dalam model dengan beberapa poin sebagai berikut:

1. Estimasi koefisien jangka panjang FMOLS dan DOLS pada kategori *full sample*, negara maju dan negara berkembang menunjukkan bahwa ECI memiliki kurva berbentuk U terbalik atau sesuai EKC untuk emisi CO₂.
2. Pada kategori *full sample* dan negara maju, penggunaan energi terbarukan dapat menurunkan emisi CO₂ sedangkan di negara berkembang meningkatkan emisi CO₂.
3. Pada kategori *full sample*, FDI tidak signifikan terhadap emisi CO₂, sedangkan di negara maju, FDI dapat menurunkan emisi CO₂. Namun, di negara berkembang justru FDI meningkatkan emisi CO₂.
4. Selanjutnya, berdasarkan hasil identifikasi titik balik (*turning point*) kurva EKC berbentuk U terbalik ditemukan pada negara Australia, Brazil, Kanada, Prancis, Jerman, India, Italia, Jepang, Korea Selatan, Meksiko, Afrika Selatan, dan Amerika Serikat. Namun, hanya negara Germany, Japan, South Korea, dan Mexico yang memiliki capaian nilai ECI yang telah melewati titik balik, sehingga terindikasi emisi CO₂ di negara tersebut telah menurun dengan peningkatan kompleksitas ekonomi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Pada kesempatan ini, Peneliti menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada Departemen Ilmu Ekonomi, IPB University melalui Beasiswa Sinergi *Fast Track* S1-S2, komisi pembimbing, dan seluruh pihak yang terlibat dalam penelitian ini. Sekaligus tak lupa, kami ucapkan kepada Jurnal Ekonomi Sakti (JES) sebagai mitra publikasi artikel ilmiah.

DAFTAR PUSTAKA

- Balsalobre-Lorente D, Parente CCS, Leitao NC, Cantos-Cantos JM. 2023a. The influence of economic complexity processes and renewable energy on CO₂ emissions of BRICS. What about industry 4.0?. *Resources Policy*. 82. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103547>
- Bilgili F, Kocak E, Bulut U. 2016. The dynamic impact of renewable energy consumption on CO₂ emissions: A revisited Environmental Kuznets Curve approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 54: 838-845. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.080>
- Destek MA, 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118537>
- [EDGAR] Emissions Database for Global Atmospheric Research. 2023. GHG emissions of all world countries. [internet]. [diakses Desember 2023]. Tersedia pada: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023
- [EIA] U.S. Energy Information Administration. 2023. Consumption Primary Energy in nuclear, renewables, and other. [internet]. [diakses Januari 2024]. Tersedia pada: <https://www.eia.gov/international/data/world>

- Elhorst JP. 2021. Cross-Sectional Dependence and Spillovers in Space and Time: Where Spatial Econometrics and Global VAR Models Meet. *Journal of Economic Surveys*. 35(1): 192–226. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/joes.12391>
- Grossman GM, Krueger AB. 1991. *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement*. In NBER Working Papers (No. 3914; NBER Working Papers). National Bureau of Economic Research, Inc. <https://www.nber.org/papers/w3914>
- Hasan MB, Wieloch J, Ali MS, Zikovic S, Uddin GS. 2023. A new answer to the old question of the environmental Kuznets Curve (EKC). Does it work for BRICS countries?. *Resources Policy* 87. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104332>
- Hausmann R, Hidalgo CA, Bustos S, Coscia M, Simoes A, Yildirim MA. 2013. *The Atlas of Economic Complexity: Mapping Paths to Prosperity*. USA: MIT Press. Tersedia pada: growthlab.hks.harvard.edu/sites/projects.iq.harvard.edu/files/growthlab/files/atlas_2013_part1.pdf
- Hoeriyah L, Nuryartono N, Pasaribu S. 2022. Economic Complexity and Sustainable Growth in Developing Countries. *Economics Development Analysis Journal*. 11(1): 23-33. <https://doi.org/10.15294/edaj.v11i1.47294>
- Huang J, Li X, Wang Y, Lei H. 2021. The effect of energy patents on China's carbon emissions: evidence from the STIRPAT model. *Technological Forecasting and Social Change*. 173. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121110>
- [IEA] International Energy Agency. 2020. Policies database. [internet]. [diakses Februari 2024]. Tersedia pada: <https://www.iea.org/policies>
- [IMF] International Monetary Fund. 2023. Country Composition of WEO Groups. [internet]. [diakses Desember 2023]. Tersedia pada: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2023/April/groups-and-aggregates>
- [IRENA] International Renewable Energy Agency. 2022. INNOVATION OUTLOOK RENEWABLE AMMONIA. [internet]. [diakses Februari 2024]. Tersedia pada: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Innovation_Outlook_Amonia_2022.pdf
- Jebli MB, Madaleno M, Schneider N, Shahzad U. 2022. What does the EKC theory leave behind? A state-of-the-art review and assessment of export diversification-augmented models. *Environmental Monitoring and Assessment*. 194(414). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10037-4>
- Kao C, Chiang MH. 2001. *On the estimation and inference of a cointegrated regression in panel data*. Baltagi, B.H., Fomby, T.B. and Carter Hill, R. (Ed.) *Nonstationary Panels, Panel Cointegration, and Dynamic Panels (Advances in Econometrics, Vol. 15)*, Emerald Group Publishing Limited, Leeds, pp. 179-222. [https://doi.org/10.1016/S0731-9053\(00\)15007-8](https://doi.org/10.1016/S0731-9053(00)15007-8)
- Kuznets S. 1955. Economic Growth and Income Inequality. *The American Economic Review*. 45: 1–28. <https://assets.aeaweb.org/asset-server/files/9438.pdf>
- Lu Z, Gozgor G, Mahalik MK, Padhan H, Yan C. 2022. Welfare gains from international trade and renewable energy demand: Evidence from the OECD countries. *Energy Economics* 112. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106153>
- Nababan R. 2013. Memahami Economic Complexity Index (ECI) Bagian I ECI Sebagai Indeks Pembangunan Ekonomi Berbasis Produk. *Jurnal Administrasi Bisnis*. 9(2): 159–169. DOI: <https://doi.org/10.26593/jab.v9i2.1212.%25p>

- Neagu O. 2019. The link between economic complexity and carbon emissions in the European Union countries: a model based on the Environmental Kuznets Curve (EKC) approach. *Sustainability*. 11(17). <https://doi.org/10.3390/su11174753>
- Neagu O, Teodoru MC. 2019. The Relationship between Economic Complexity, Energy Consumption Structure and Greenhouse Gas Emission: Heterogeneous Panel Evidence from the EU Countries. *Sustainability*. 11(2). <https://doi.org/10.3390/su11020497>
- [OEC] Observatory of Economic Complexity. 2023. Economic Complexity Index Country Rankings. [internet]. [diakses Desember 2023]. Tersedia pada: <https://oec.world/en/rankings/eci/hs6/hs96?tab=ranking>
- Saqib N, Dinca G. 2023. Exploring the asymmetric impact of economic complexity, FDI, and green technology on carbon emissions: Policy stringency for clean-energy investing countries. *Geoscience Frontiers*. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101671>
- [UNEP] UN Environment Programme. 2023. Global Temperature Change. [internet]. [diakses Desember 2023]. Tersedia pada: <https://data.unep.org/climate/essential-climate-variables-ecv/global-temperature-change>
- Ye C, Zheng Y, Han X, Chen S. 2023. Can increased economic complexity and reduced carbon emissions of the logistics industry go hand in hand? Evidence from countries along the Belt and Road. *Advances in Climate Change Research*. 14(5): 789-797. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2023.09.012>
- Zhao J, Shahbaz M, Dong X, Dong K. 2021. How does financial risk affect global CO2 emissions? The role of technological innovation. *Technological Forecasting and Social Change*. 168. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120751>