

Determinan Emisi Karbon Dioksida di Indonesia: Analisis Partial Adjustmen

**Yesi Widawati; Muhammad Anas, S.E., M.Si.
Ekonomi Pembangunan, Ekonomi dan Bisnis, universitas Muhammadiyah Surakarta**

Abstrak

Emisi CO₂ merupakan pelepasan gas karbon dioksida ke atmosfer sebagai hasil aktivitas sosial ekonomi masyarakat. Peningkatan emisi CO₂ di atmosfer sangat berpengaruh terhadap perubahan iklim, dan hal itu dapat berdampak pada sektor-sektor ekonomi di Indonesia. Faktor-faktor yang dapat memengaruhi emisi CO₂ antara lain pertumbuhan ekonomi, penanaman modal asing, konsumsi listrik, dan ekspor batu bara, sehingga penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi pengaruh keempat variabel tersebut terhadap kualitas lingkungan di Indonesia, ditinjau dari tingkat emisi CO₂, tahun 1990-2020 dalam jangka pendek dan jangka panjang dengan regresi Partial Adjustment Model (PAM). Berdasarkan hasil regresi, diketahui bahwa dalam jangka pendek maupun jangka panjang, penanaman modal asing dan ekspor batu bara tidak berpengaruh terhadap emisi CO₂, sedangkan pertumbuhan ekonomi berpengaruh positif dan konsumsi listrik berpengaruh negatif terhadap emisi CO₂ di Indonesia. Pemerintah diharapkan meregulasi sektor-sektor penghasil emisi CO₂ tinggi untuk mulai menerapkan praktik operasional bisnis yang dapat menghasilkan emisi CO₂ yang lebih rendah. Mengingat bahayanya pengaruh perubahan iklim terhadap ketahanan pangan dan sektor ekonomi di Indonesia. Penanaman modal asing dengan asas keberlanjutan lingkungan seperti penggunaan teknologi dan pembangunan infrastruktur rendah emisi perlu ditingkatkan.

Kata Kunci: CO₂, PDB, penanaman modal asing, konsumsi listrik, ekspor batu bara, Partial Adjustment Model

Abstract

CO₂ emissions are the release of carbon dioxide gas into the atmosphere as a result of community socio-economic activities. Increasing CO₂ emissions in the atmosphere have a big impact on climate change, and this can have an impact on economic sectors in Indonesia. Factors that can influence CO₂ emissions include economic growth, foreign direct investment, electricity consumption and coal exports, so this research aims to estimate the influence of these four variables on environmental quality in Indonesia, in terms of CO₂ emission levels, 1990- 2020 in the short term and long term with Partial Adjustment Model (PAM) regression. The regression results shows that both in the short and long term, foreign investment and coal exports have no effect on CO₂ emissions, while economic growth has a positive effect and electricity consumption has a negative effect on CO₂ emissions in Indonesia. The government is expected to regulate sectors that produce high CO₂ emissions to start implementing business operational practices that can produce lower CO₂ emissions. Considering the dangerous influence of climate change on food security and the economic sector in Indonesia. Foreign investment based on environmental sustainability principles such as the use of technology and the development of low-emission infrastructure needs to be increased.

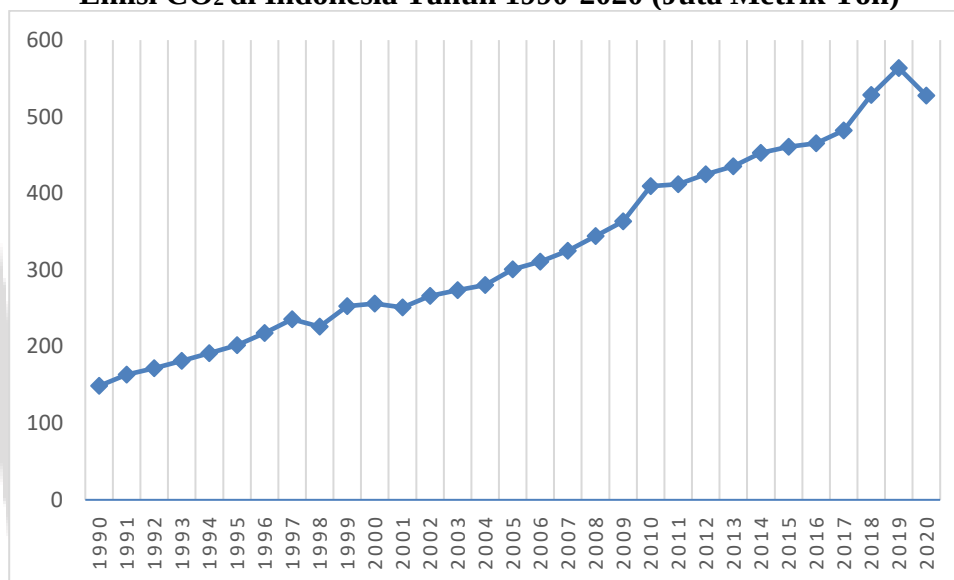
Keywords: CO₂, GDP, foreign direct investment, electricity consumption, coal exports, Partial Adjustment Model.

1. Pendahuluan

Lingkungan alam memiliki peran penting dalam proses pembangunan ekonomi. Ketersediaan sumber daya alam yang melimpah seperti air, tanah, dan energi merupakan pondasi vital bagi berbagai

sektor ekonomi, tak terkecuali Indonesia. Namun, eksploitasi berlebih dan aktivitas manusia yang menghasilkan emisi CO₂ menyebabkan kerusakan lingkungan serta perubahan iklim. Perubahan iklim yang ekstrim akan berdampak pada sektor pertanian, perkebunan, dan kelautan. Padahal ketiga sektor tersebut merupakan penyumbang PDB terbesar di Indonesia yaitu sejumlah Rp2428,9 triliun. Terjadinya perubahan iklim akan mempengaruhi pertumbuhan hasil pada sektor tersebut serta meningkatnya risiko krisis pangan di masa mendatang (Nurhayati et al., 2020).

Grafik 1
Emisi CO₂ di Indonesia Tahun 1990-2020 (Juta Metrik Ton)



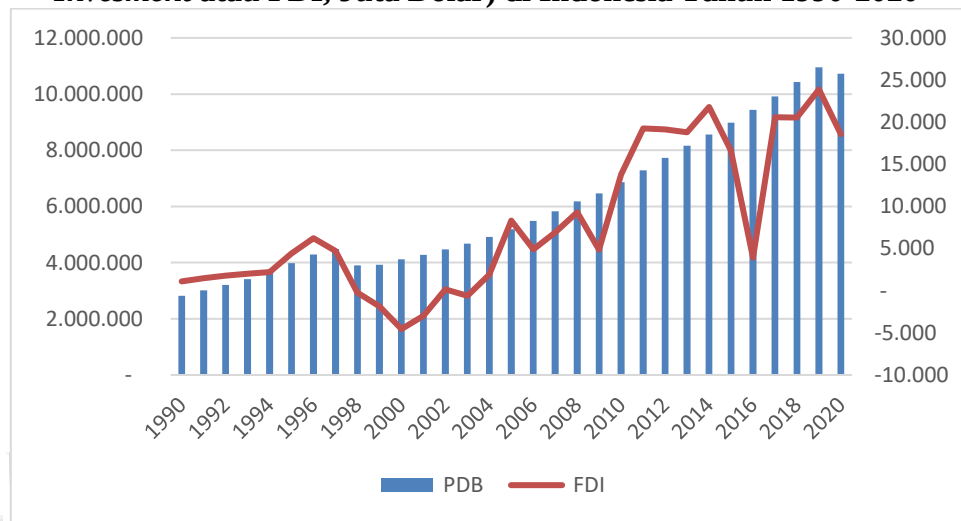
Sumber: *Energy Information Administration (EIA)*

Berdasarkan Grafik 1, tingkat emisi CO₂ di Indonesia dari tahun 1990-2020 cenderung mengalami peningkatan meskipun terdapat sedikit fluktuasi. Hal ini mengindikasikan bahwa degradasi lingkungan di Indonesia semakin tinggi. Peningkatan emisi CO₂ merupakan tanda bahwa aktivitas manusia dalam menghasilkan emisi karbon semakin banyak, terutama pada sektor yang berkaitan dengan energi fosil, transportasi, serta industri. Grafik 1 menunjukkan bahwa pada tahun 2020, emisi CO₂ sempat mengalami penurunan dari 563,63 juta metrik ton menjadi 527,74 juta metrik ton. Penurunan emisi CO₂ ini disebabkan adanya wabah *Covid-19* sehingga terjadi *lockdown* yang membatasi aktivitas sosial ekonomi masyarakat seperti transportasi, industri, manufaktur, dan kegiatan ekspor bahan bakar fosil (Nguyen et al., 2021).

Aktivitas ekonomi merupakan penggerak utama dalam pembangunan dan pertumbuhan sosial ekonomi negara. Namun, pertumbuhan ekonomi yang cepat juga sering diiringi dengan peningkatan konsumsi sumber daya alam, seperti energi, air, serta bahan mentah, yang jika dilakukan secara terus menerus dapat terjadi eksploitasi yang menyebabkan degradasi lingkungan. Sektor ekonomi seperti industri, pertanian, dan transportasi merupakan sektor yang secara intensif menggunakan sumber daya alam, terutama bahan bakar fosil, yang menghasilkan emisi gas rumah kaca serta berkontribusi terhadap kenaikan suhu dan perubahan iklim global. Dampak yang lebih parah akibat hal ini adalah terjadi

banjir, kekeringan, dan krisis pangan. (Stern, 2006)

Grafik 2
Produk Domestik Bruto (PDB, Miliar Rupiah) dan Investasi Asing Langsung (*Foreign Direct Investment* atau FDI, Juta Dolar) di Indonesia Tahun 1990-2020

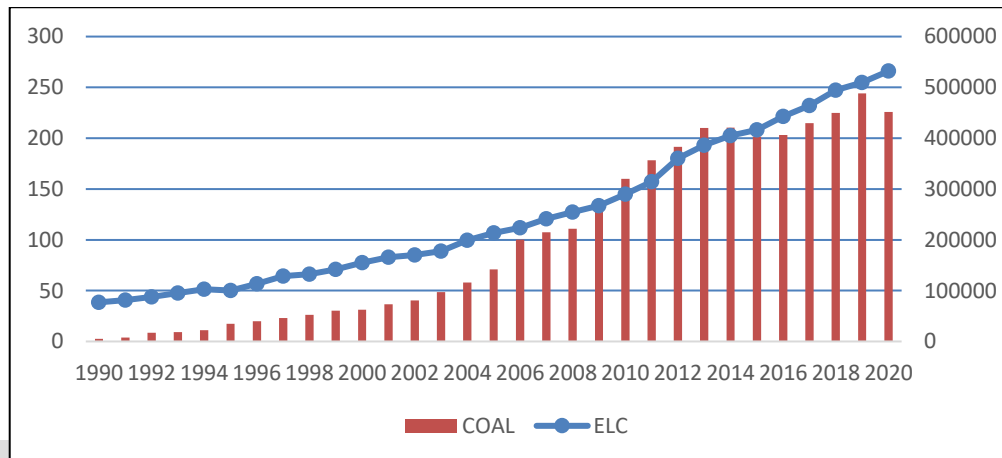


Sumber: Badan Pusat Statistik (BPS), *United Nations Conference on Trade and Development* (UNCTAD)

Grafik 2 menunjukkan bahwa PDB tahun 1990-2020 cenderung konstan mengalami kenaikan, terutama sejak krisis keuangan 1998. Setelah krisis, Indonesia melakukan reformasi ekonomi dengan memperbaiki iklim investasi dan stabilitas ekonomi makro. Perbaikan pada iklim investasi dapat meningkatkan investasi langsung baik dari luar maupun dalam negeri sehingga membuka lapangan pekerjaan baru dan meningkatkan pertumbuhan ekonomi (Prawira et al., 2019). Di sisi lain, FDI Indonesia cenderung mengalami kenaikan namun terdapat penurunan tajam seperti pada 1997, 2016, dan 2020. Penurunan ini merupakan dampak dari ketidakpastian ekonomi global serta regulasi terkait investasi di Indonesia. Indonesia memiliki peluang investasi besar, namun penanaman modal asing pada sektor industri pengolahan migas, tambang, dan manufaktur berpotensi besar meningkatkan polutan dan emisi CO₂ (Wang & Huang, 2022).

Selain PDB dan investasi, faktor lain yang dapat berdampak signifikan terhadap kualitas lingkungan adalah konsumsi listrik dan ekspor batu bara. Konsumsi listrik yang tidak efisien terutama yang bersumber dari energi fosil berpengaruh terhadap peningkatan emisi CO₂ dalam jangka panjang (Lean & Smyth, 2010a). Sementara itu, Indonesia merupakan salah satu negara dengan potensi ekspor energi batu bara terbesar yang dapat menjadi sumber devisa negara. Namun, proses produksi dan distribusi batu bara dapat menghasilkan gas buangan berupa CO₂ yang dapat berdampak pada kualitas lingkungan karena berpotensi mengganggu ekosistem, mengubah iklim, menyebabkan polusi udara, serta penurunan keragaman hayati (Lin et al., 2018).

Grafik 3
Ekspor Batu Bara (COAL, Ribu Ton), Konsumsi Listrik (ELC, Miliar kWh) di Indonesia
Tahun 1990-2020



Sumber: EIA

Berdasarkan Grafik 3, terlihat bahwa konsumsi listrik dan ekspor batu bara cenderung mengalami peningkatan dengan beberapa kali fluktuasi. Peningkatan konsumsi listrik Indonesia dari 1990-2020 merupakan suatu fenomena yang terjadi pada negara yang sedang mengalami pertumbuhan ekonomi. Pertumbuhan ekonomi negara yang tinggi mendorong proporsi penduduk di perkotaan bertambah sehingga kegiatan produksi yang memerlukan energi listrik turut meningkat (Agung, 2017). Sementara itu, volume ekspor batu bara tertinggi terjadi pada tahun 2019 dan mengalami penurunan pada 2020 akibat penurunan permintaan akan batu bara sebagai imbas pandemi *Covid-19* (Hanafi, 2021).

Sumber daya alam serta kualitas lingkungan merupakan faktor penting dalam pembangunan ekonomi Indonesia, sehingga keberlanjutan SDA dan kualitas lingkungan merupakan hal yang wajib diperhitungkan. Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi pengaruh pertumbuhan ekonomi, investasi asing, konsumsi listrik, dan ekspor batu bara terhadap kualitas lingkungan ditinjau dari tingkat emisi CO₂ di Indonesia tahun 1990-2020.

2. Tinjauan Pustaka

Hwang & Yoo (2014) mengestimasi pengaruh pertumbuhan ekonomi terhadap emisi CO₂ pada tahun 1965-2006 di Indonesia menggunakan metode *Error Correction Model* (ECM), dan menemukan bahwa pertumbuhan ekonomi berpengaruh positif terhadap emisi CO₂ dalam jangka pendek dan jangka panjang. Hal ini terjadi karena pertumbuhan ekonomi mengakibatkan tingginya konsumsi energi, sehingga emisi karbon yang dihasilkan juga meningkat. Selanjutnya, Mikayilov et al. (2018) meneliti pengaruh pertumbuhan ekonomi terhadap emisi CO₂ di Azerbaijan tahun 1992-2013 dengan regresi data *time series* menggunakan metode *Autoregressive Distributed Lag* (ARDL). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dalam jangka pendek maupun jangka panjang, kenaikan pertumbuhan ekonomi cenderung meningkatkan emisi CO₂. Namun, dalam jangka pendek, emisi CO₂ dapat kembali pada

kondisi normal dalam waktu kurang dari satu tahun. Lalu, Lægreid & Povitkina (2018) dengan regresi data panel menggunakan metode *Dynamic Common Correlated Effects* (DCCE) melakukan penelitian di 156 negara tahun 1972-2014 dan menemukan bahwa Produk Domestik Bruto (PDB) berpengaruh positif terhadap emisi CO₂, namun dampak negatif PDB tidak terlalu besar terhadap negara-negara kaya dengan pemerintahan yang baik dan masyarakat sipil yang aktif. Mendonça et al. (2020) mengestimasi pengaruh PDB, populasi, dan pembangkit energi terbarukan terhadap emisi CO₂ di 50 negara dengan perekonomian terbesar pada tahun 1990-2015 dengan regresi data panel menggunakan metode *Fixed Effects Model* (FEM). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa PDB dan populasi berpengaruh positif terhadap emisi CO₂ di 50 negara tersebut. Teori *Environmental Kuznets Curve* (EKC) menyatakan bahwa terdapat hubungan antara pertumbuhan ekonomi dalam suatu negara dengan degradasi lingkungan pada negara tersebut. Analogi ini diambil dari kurva Kuznets yang menyatakan bahwa dalam tahap awal pertumbuhan ekonomi maka degradasi lingkungan pada daerah tersebut akan mengalami peningkatan (Özcan Burcu & Öztürk İlhan, 2019).

Shahbaz et al. (2018) meneliti faktor-faktor yang memengaruhi emisi CO₂ di Prancis pada tahun 1955-2016 menggunakan metode ARDL. Ditemukan bahwa investasi asing berpengaruh positif terhadap emisi CO₂ dalam jangka pendek. Disebutkan pula bahwa waktu yang diperlukan untuk mencapai jalur keseimbangan jangka panjang adalah tujuh tahun sembilan bulan. Dalam jangka panjang, investasi asing juga berpengaruh positif terhadap emisi CO₂ di Prancis. Sementara itu, pengeluaran untuk penelitian inovasi energi berpengaruh negatif terhadap emisi CO₂ di Prancis. Kemudian, Huang et al. (2019) menggunakan regresi data panel dengan model *Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology* (STIRPAT) dan menemukan bahwa investasi asing berpengaruh negatif terhadap emisi CO₂ pada tahun 1997-2014 pada 30 provinsi di China.

Selanjutnya, Essandoh et al. (2020) meneliti pengaruh perdagangan internasional dan investasi asing terhadap emisi CO₂ di 52 negara pada tahun 1991-2014 yang diklasifikasikan menjadi negara maju dan berkembang, menggunakan regresi data panel dengan metode *Pooled Mean Group-Autoregressive Distributive Lag* (PMG-ARDL). Ditemukan bahwa dalam jangka pendek, investasi asing tidak berpengaruh terhadap baik di negara berpenghasilan tinggi maupun rendah. Sementara itu, dalam jangka panjang, investasi asing berpengaruh positif terhadap emisi CO₂ di negara berpenghasilan rendah, sedangkan di negara berpenghasilan tinggi dalam jangka panjang, investasi asing tidak berpengaruh terhadap emisi CO₂. Sementara itu, penelitian yang dilakukan oleh Rizki & Anggaeni (2022) terkait pengaruh FDI terhadap emisi karbon di Indonesia tahun 1990-2020 menggunakan metode ECM menemukan bahwa dalam jangka pendek, FDI tidak berpengaruh terhadap emisi karbon di Indonesia. Sementara itu, dalam jangka panjang, FDI berpengaruh negatif terhadap emisi karbon di Indonesia karena aliran dana investor asing telah bertambah bertambah pada beberapa tahun terakhir untuk menyediakan energi terbarukan. Selain itu, rata-rata perusahaan asing lebih hemat

energi dibandingkan perusahaan domestik.

Lean & Smyth (2010) dengan panel *Dynamic Ordinary Least Squares* (DOLS) menemukan bahwa konsumsi listrik berpengaruh positif terhadap emisi CO₂ di lima negara ASEAN (Indonesia, Malaysia, Filipina, Singapura, dan Thailand) tahun 1980-2006. Selanjutnya, Shahbaz et al. (2014) dengan regresi ARDL mengestimasi pengaruh industrialisasi dan konsumsi listrik terhadap CO₂ di Bangladesh tahun 1975-2010. Ditemukan bahwa industrialisasi dan konsumsi listrik tidak berpengaruh terhadap emisi CO₂ dalam jangka pendek. Hal ini disebabkan karena keberadaan teknologi dan kebijakan yang mendorong efisiensi energi. Sementara itu, dalam jangka panjang, industrialisasi dan konsumsi listrik berpengaruh positif terhadap emisi CO₂. Sementara itu, Bello et al. (2018) pada tahun 1971-2016 di Malaysia mengestimasi pengaruh konsumsi listrik terhadap emisi CO₂. Melalui regresi *Vector Error Correction Model* (VECM), ditemukan bahwa konsumsi listrik berpengaruh negatif terhadap emisi CO₂. Peningkatan konsumsi listrik dapat menurunkan emisi karbon dikarenakan terdapat produksi energi terbarukan seperti tenaga air yang dapat mengurangi degradasi lingkungan, termasuk emisi karbon.

Kemudian, Jiang et al. (2021) dengan regresi data *time series* menggunakan metode ARDL menemukan bahwa dalam jangka pendek maupun jangka panjang, konsumsi listrik dapat meningkatkan emisi karbon di China pada tahun 1985-2018. Hal ini dikarenakan sumber energi yang digunakan adalah energi fosil yang menghasilkan emisi karbon tinggi. Sementara itu, Waheed et al. (2018) pada tahun 1990-2014 di Pakistan mengestimasi pengaruh konsumsi energi terbarukan terhadap emisi CO₂ menggunakan metode ARDL, dan menemukan bahwa dalam jangka pendek dan jangka panjang, konsumsi energi terbarukan dapat membantu menurunkan jumlah emisi karbon di negara tersebut.

Sarkodie & Strezov (2018) mengestimasi pengaruh portofolio energi terhadap degradasi lingkungan dan emisi CO₂ di Australia pada tahun 1974-2013 menggunakan *Fully Modified Ordinary Least Squares* (FMOLS). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ekspor energi termasuk batu bara, gas alam, gas minyak bumi cair, dan minyak mentah berpengaruh negatif terhadap emisi CO₂. Selain itu, penelitian terkait juga dilakukan oleh Aimon et al. (2023) mengenai ekspor batu bara serta pengaruhnya terhadap emisi karbon pada negara pengekspor batu bara di Asia Pasifik yaitu Indonesia dan Australia tahun 2000-2022 dengan menggunakan regresi data panel dengan model *Two -Stage Least Square* (2SLS). Hasil regresi persamaan simultan menunjukkan bahwa produksi, konsumsi, stok batu bara, investasi dalam negeri, dan nilai tukar berpengaruh positif terhadap ekspor batu bara. Kemudian, regresi panel FEM menunjukkan bahwa ekspor batu bara berpengaruh positif terhadap emisi karbon pada kedua negara.

Perbedaan penelitian ini dengan penelitian terdahulu terletak pada pendekatan model analisis yang digunakan. Penelitian ini menggunakan *Partial Adjustment Model* (PAM). Diharapkan penelitian ini

dapat memberikan hasil estimasi yang akurat terkait seberapa besar pengaruh pertumbuhan ekonomi, investasi asing, ekspor batu bara dan konsumsi listrik terhadap kualitas lingkungan ditinjau dari tingkat emisi CO₂ yang dihasilkan dalam jangka pendek dan jangka panjang. Regresi PAM juga diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih mendalam mengenai waktu yang dibutuhkan untuk mencapai emisi CO₂ yang lebih ideal.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode regresi linier berganda dengan alat analisis *Partial Adjustment Model* (PAM), yang mengasumsikan keberadaan suatu hubungan keseimbangan jangka panjang dua atau lebih variabel. Dalam jangka pendek, namun demikian, yang terjadi adalah ketidakseimbangan (Gujarati & Porter, 2003). Bentuk model umum PAM yang memformulasikan hubungan jangka panjang adalah sebagai berikut:

$$Y_t^* = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon_t$$

Persamaan regresi jangka panjang dalam penelitian ini adalah:

$$\log CO2_t = \beta_0 + \beta_1 \log GDP_t + \beta_2 FDI_t + \beta_3 ELC_t + \beta_4 COAL_t + \varepsilon_t$$

Perilaku penyesuaian partial PAM diformulasikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$CO2_t - CO2_{t-1} = \delta(CO2_t^* - CO2_{t-1})$$

Dengan melakukan substitusi persamaan jangka panjang ke dalam persamaan penyesuaian, maka akan diturunkan persamaan jangka pendek sebagai berikut:

$$Y_t - Y_{t-1} = \delta(Y_t^* - Y_{t-1})$$

$$Y_t - Y_{t-1} = \delta Y_t^* - \delta Y_{t-1}$$

$$Y_t = \delta Y_t^* - \delta Y_{t-1} + Y_{t-1}$$

$$Y_t = \delta Y_t^* + (1 - \delta)Y_{t-1}$$

$$Y_t = \delta(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon_t) + (1 - \delta)Y_{t-1}$$

$$Y_t = \delta\beta_0 + \delta\beta_1 X_1 + \delta\beta_2 X_2 + \delta\varepsilon_t + (1 - \delta)Y_{t-1}$$

$$Y_t = \delta\beta_0 + \delta\beta_1 X_1 + \delta\beta_2 X_2 + (1 - \delta)Y_{t-1} + \delta\varepsilon_t$$

Dengan demikian, diperoleh persamaan jangka pendek sebagai berikut:

$$\log CO2_t = \delta\beta_0 + \delta\beta_1 \log GDP_t + \delta\beta_2 FDI_t + \delta\beta_3 ELC_t + \delta\beta_4 COAL_t + (1 - \delta)\log CO2_{t-1} + \delta\varepsilon_t$$

Keterangan:

CO₂ : Emisi karbon dioksida (juta metrik ton)

GDP : Produk domestik bruto (PDB) (miliar rupiah)

FDI : Penanaman modal asing (juta dolar)

ELC	: Konsumsi listrik (miliar kWh)
$COAL$	: Ekspor batu bara (ribu ton)
δ	: Koefisien penyesuaian
β_0	: Konstanta
$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$	: Koefisien variabel independen
$1 - \delta$	: Koefisien CO_2 periode sebelumnya
t	: Periode
v	: Residual

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif yang menggunakan data sekunder berupa deret berkala (*time series*) tahunan. Data yang digunakan diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS), *United Nations Conference on Trade and Development* (UNCTAD), dan *Energy Information Administration* (EIA). Supaya PAM valid, koefisien CO_2_{t-1} harus berada di antara nol dan satu dan harus signifikan atau terbukti nyata secara statistik.

Penelitian ini juga akan menguji apakah model regresi memenuhi asumsi Gauss-Markov, yang meliputi normalitas residual (Uji Jarque-Bera), residual yang bersifat homoskedastis (Uji White), dan tidak ada autokorelasi (Uji Breusch-Godfrey). Selain itu, akan dilihat juga *Variance Inflation Factors* (VIF) masing-masing variabel independen untuk mengetahui apakah terjadi multikolinieritas.

Selain uji di atas, perlu dilakukan juga uji F untuk mengetahui apakah ada pengaruh dari variabel-variabel independen secara bersama-sama terhadap variabel dependen. H_0 pada uji F adalah produk domestik bruto, penanaman modal asing, konsumsi listrik, dan ekspor batu bara secara bersama-sama tidak berpengaruh terhadap emisi karbon dioksida. H_0 akan ditolak jika probabilitas F -statistik $< \alpha$.

Kemudian, uji t juga perlu dilakukan untuk mengetahui apakah variabel independen secara individu berpengaruh nyata terhadap variabel dependen. H_0 uji t menyatakan bahwa masing-masing variabel independen tidak berpengaruh terhadap emisi CO_2 ($\delta\beta_i = 0$, di mana $i = 1-4$). Adapun H_A menyatakan bahwa $\delta\beta_i > 0$, di mana $i = 1-4$, yang berarti PDB, penanaman modal asing, konsumsi listrik, ekspor batu bara masing-masing berpengaruh positif terhadap emisi CO_2 .

4. Hasil dan Pembahasan

Untuk mengestimasi pengaruh PDB, investasi asing, konsumsi listrik, dan ekspor batu bara terhadap emisi CO_2 di Indonesia 1990-2020, penelitian ini menggunakan teknik *Partial Adjustment Model* (PAM). Hasil estimasi PAM beserta uji asumsi Gauss-Markov terangkum dalam Tabel 1.

Berdasarkan Tabel 1, terlihat nilai koefisien regresi emisi karbon dioksida tahun sebelumnya ($1 - \delta$) adalah sebesar 0,7119; sehingga $\delta = 1 - 0,7119$ dan diperoleh hasil sebesar 0,2881 atau 28,81%. Kemudian, $1 - \delta$ terbukti nyata karena probabilitas t -statistiknya kurang dari 0,05. Dengan demikian, syarat validitas PAM terpenuhi, sehingga model penelitian ini dapat merepresentasikan keberadaan hubungan teoretik jangka pendek dan jangka panjang antara variabel dependen dan variabel

independen. Penyesuaian nilai emisi karbon dioksida dalam satu periode sebesar 28,81%, sehingga penyesuaian nilai emisi karbon dioksida menuju tingkat emisi karbon dioksida yang diinginkan cenderung tidak terlalu cepat.

Tabel 1
Hasil Estimasi PAM

$\log CO2_t = -3,2523 + 0,3222\log GDP_t - 0,00002FDI_t - 0,0010ELC_t + 0,00002COAL_t + 0,7119\log CO2_{t-1}$					
	(0,03)**	(0,88)	(0,08)***	(0,31)	(0,00)*
$R^2 = 0,99$; DW-Stat = 2,21; F-Stat = 621,94; Sig. F-Stat = 0,00					

Uji Diagnosis

(1) Multikolinieritas (VIF)

$$\log GDP = 75,25; FDI = 6,82; ELC = 39,41; COAL = 49,45; \log CO2(-1) 36,76$$

(2) Normalitas (Uji Jarque-Bera)

$$\chi^2(2) = 3,93 \text{ Sig. } \chi^2(2) = 0,14$$

(3) Autokorelasi (Uji Breusch-Godfrey)

$$\chi^2(3) = 2,78 \text{ Sig. } \chi^2(3) = 0,42$$

(4) Heteroskedastisitas (Uji White)

$$\chi^2(20) = 25,16 \text{ Sig. } \chi^2(20) = 0,15$$

Sumber: BPS, UNCTAD, dan EIA, diolah

Keterangan: *Signifikan pada $\alpha = 0,01$; **Signifikan pada $\alpha = 0,05$; ***Signifikan pada $\alpha = 0,1$

$$1 - \delta = 0,7119$$

$$\delta = 1 - 0,7119 = 0,2881$$

$$1) \alpha_0 = \delta \beta_0$$

$$-3,2523 = 0,2881\beta_0$$

$$\beta_0 = \frac{\delta \beta_0}{\delta} = \frac{-3,2523}{0,2881} = -11,2887$$

$$2) \alpha_1 = \delta \beta_1$$

$$0,3222 = 0,2881\beta_1$$

$$\beta_1 = \frac{\delta \beta_1}{\delta} = \frac{0,3222}{0,2881} = 1,1183$$

$$3) \alpha_2 = \delta \beta_2$$

$$-0,0000287 = 0,2881\beta_2$$

$$\beta_2 = \frac{\delta \beta_2}{\delta} = \frac{-0,0000287}{0,2881} = -0,0000996$$

$$4) \alpha_3 = \delta \beta_3$$

$$-0,0010 = 0,2881\beta_3$$

$$\beta_3 = \frac{\delta \beta_3}{\delta} = \frac{-0,0010}{0,2881} = -0,00347$$

$$5) \alpha_4 = \delta \beta_4$$

$$0,0000281 = 0,2881\beta_0$$

$$\beta_4 = \frac{\delta\beta_4}{\delta} = \frac{0,0000281}{0,2881} = 0,0000975$$

Dari penghitungan konstanta dan koefisien, diperoleh model estimator jangka panjang sebagai berikut:

$$\log CO2_t = -11,2887 + 1,1183 \log PDB_t - 0,0000996 FDI_t - 0,00347 ELC_t + 0,0000975 COAL_t$$

Hasil Uji Jarque-Bera (JB) menunjukkan probabilitas statistik JB sebesar 0,1398 yang berarti lebih dari α 0,1; sehingga residual terdistribusi normal. Kemudian, probabilitas statistik χ^2 pada Uji Breusch-Godfrey (BG) sebesar 0,4257 yang berarti bahwa tidak terdapat masalah autokorelasi pada model. Hasil Uji White menunjukkan probabilitas χ^2 sebesar 0,1550 (lebih dari 0,1) yang berarti bahwa residual bersifat homoskedastis. Terdapat tiga variabel independen yang memiliki *Variance Inflation Factors* (VIF) lebih dari 10, yaitu produk domestik bruto, konsumsi listrik, dan ekspor batu bara. Meski demikian, dua dari empat variabel independen memiliki probabilitas *t*-statistik koefisien yang kurang dari 0,1; sehingga multikolinearitas dapat diabaikan.

Uji *F* menghasilkan probabilitas *F*-statistik sebesar 0,000 yang berarti kurang dari α 0,05; sehingga secara bersama-sama, PDB, penanaman modal asing, konsumsi listrik, dan ekspor batu bara berpengaruh terhadap emisi CO₂. Kemudian, koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9923 berarti 99,23% variasi emisi CO₂ disebabkan oleh variasi PDB, penanaman modal asing, konsumsi listrik, dan ekspor batu bara, sedangkan 0,77% lainnya disebabkan oleh variasi variabel di luar model. Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa koefisien yang terbukti nyata adalah $\delta\beta_1$ dan $\delta\beta_3$, sehingga variabel independen yang berpengaruh nyata terhadap emisi CO₂ PDB dan ekspor batu bara, sedangkan penanaman modal asing dan konsumsi listrik tidak berpengaruh.

Berdasarkan Tabel 1, terbukti bahwa PDB berpengaruh positif terhadap emisi CO₂, sedangkan konsumsi listrik berpengaruh negatif. Penanaman modal asing dan ekspor batu bara tidak berpengaruh terhadap emisi CO₂ karena probabilitas *t*-statistik koefisiennya lebih dari 0,1. Dengan demikian, $\delta\beta_2$ dan $\delta\beta_4$ tidak perlu diinterpretasikan karena tidak signifikan. Koefisien PDB dalam jangka pendek dan jangka panjang adalah sebesar 0,3222 dan 1,1183. Artinya, 1% kenaikan PDB akan meningkatkan emisi CO₂ sebesar 0,3222% dalam jangka pendek dan 1,1183% dalam jangka panjang. Koefisien konsumsi listrik dalam jangka pendek dan jangka panjang adalah sebesar 0,00104 dan 0,00347. Artinya, apabila konsumsi listrik naik 1%, maka emisi CO₂ akan turun sebesar 0,104% dalam jangka pendek dan 0,347% dalam jangka panjang.

Berdasarkan hasil regresi, diketahui bahwa penanaman modal asing dan ekspor batu bara tidak berpengaruh terhadap emisi CO₂ dalam jangka pendek maupun dalam jangka panjang, sehingga tidak sesuai dengan hipotesis. Hal ini terjadi karena dalam beberapa tahun terakhir, pemerintah telah menetapkan regulasi sebagai upaya menuju *green economy* di Indonesia. UU nomor 25 tahun 2007 pasal 16 mengamanatkan bahwa setiap penanam modal baik asing maupun dalam negeri bertanggung

jawab dalam kelestarian lingkungan hidup. Peraturan tersebut didukung Perpres nomor 16 tahun 2012 pasal 2 yang mengamanatkan bahwa salah satu arah kebijakan penanam modal adalah berwawasan lingkungan (*green investment*).

Berdasarkan Tabel 2, diketahui bahwa pertambangan (yang di dalamnya mencakup batu bara) dan perindustrian merupakan sektor-sektor dengan realisasi PMA terbesar dalam sepuluh tahun terakhir. Terkait hal ini, pemerintah telah mengatur tentang ekonomi hijau pada sektor-sektor tersebut, seperti dalam UU nomor 4 tahun 2009 pasal 96 tentang kewajiban pemegang IUP dan IUPK untuk melakukan pengelolaan dan pemantauan lingkungan tambang, termasuk kegiatan reklamasi dan pasca tambang. Selain itu, ada juga UU nomor 3 tahun 2014 tentang industri hijau, di mana setiap perusahaan industri wajib mengikuti standar industri hijau. Oleh karena itu, penanaman modal asing dan ekspor batu bara tidak berpengaruh signifikan terhadap emisi karbon di Indonesia.

Tabel 2
Lima Sektor dengan Jumlah Realisasi Investasi Asing Terbesar Tahun 2010-2020 (Ribu Dolar)

Sektor	Investasi
Pertambangan	7.992.218,4
Transportasi, Gudang dan Telekomunikasi	3.404.992,8
Listrik, Gas dan Air	2.607.618,1
Industri Logam Dasar, Barang Logam, Bukan Mesin dan Peralatannya	3.722.251,8
Industri Kimia dan Farmasi	3.086.566,0

Sumber: *National Single Window for Investment (NSWI)*

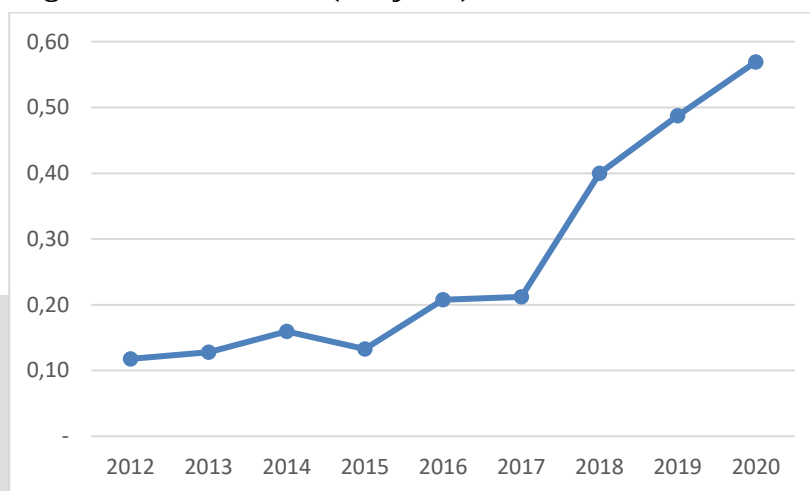
Hasil ini juga mendukung temuan Rizki & Anggaeni (2022), di mana penanaman modal asing tidak berpengaruh terhadap emisi karbon di Indonesia tahun 1990-2020 karena aliran dana dari investor asing telah bertambah pada beberapa tahun terakhir untuk menyediakan energi terbarukan.

PDB ditemukan berpengaruh positif terhadap emisi CO₂, sehingga sesuai dengan hipotesis. Berdasarkan Grafik 1 dan 2, nampak bahwa grafik CO₂ dan PDB sama-sama memiliki kecenderungan meningkat. Lalu, pada tahun 2020, PDB Indonesia mengalami penurunan. Hal yang sama juga terjadi pada grafik emisi CO₂ tahun 2020. Pandemi *Covid-19* menyebabkan penurunan pada kegiatan ekonomi di Indonesia. Kebijakan seperti *lockdown* mengakibatkan penghentian kegiatan industri dan transportasi sehingga terjadi penurunan PDB. Pembatasan sementara ini, secara tidak langsung berdampak pada pengurangan dalam penggunaan bahan bakar fosil yang pada akhirnya dapat mengurangi emisi karbon. Hasil penelitian ini mendukung teori EKC yang menyatakan bahwa dalam tahap awal pertumbuhan ekonomi maka degradasi lingkungan pada daerah tersebut akan mengalami peningkatan (Özcan Burcu & Öztürk İlhan, 2019). Hasil yang serupa juga ditemukan oleh Hwang & Yoo (2014) pada tahun 1965-2006, di mana peningkatan pertumbuhan ekonomi mengakibatkan tingginya konsumsi energi sehingga emisi karbon yang dihasilkan juga meningkat.

Pengaruh negatif terhadap emisi karbon dioksida ditemukan pada variabel konsumsi listrik, sehingga tidak sesuai dengan hipotesis. Berdasarkan Grafik 3, nampak bahwa konsumsi listrik terus

meningkat. Namun, Grafik 4 menunjukkan bahwa konsumsi energi baru terbarukan juga terus mengalami peningkatan dari tahun 2012-2020. Matahari, air, angin, dan biomassa dapat menghasilkan energi dengan emisi yang rendah. Penggunaan energi terbarukan dalam campuran energi umum dapat membantu mengurangi penurunan emisi karbon (Waheed et al., 2018).

Grafik 4
Energi Baru Terbarukan (Exajoule) Indonesia Tahun 2012-2020



Sumber: *Statistical Review of World Energy*

Upaya konservasi oleh Kementerian ESDM dalam pembangunan pembangkit listrik dengan teknologi batu bara yang ramah lingkungan (*clean coal technology*) dan pembangkit uap efisiensi tinggi (*ultra supercritical*) untuk pembangunan energi terbarukan dapat menurunkan emisi gas rumah kaca pada sektor energi sebesar 7,30% (Kurniarahma et al., 2020).

Hal ini juga sesuai dengan temuan Bello et al. (2018) pada tahun 1971-2016 di Malaysia, yang menyatakan bahwa peningkatan konsumsi listrik dapat menurunkan emisi karbon dikarenakan terdapat produksi energi terbarukan seperti tenaga air yang dapat mengurangi degradasi lingkungan termasuk emisi karbon. Namun, hasil penelitian ini tidak sejalan dengan temuan Jiang et al. (2021) tahun 1985-2018 di China, di mana konsumsi listrik dapat meningkatkan emisi karbon dikarenakan sumber energi yang digunakan adalah energi fosil yang menghasilkan emisi karbon tinggi.

5. Penutup

Emisi CO₂ merupakan pelepasan gas karbon dioksida ke atmosfer sebagai hasil aktivitas sosial ekonomi masyarakat. Peningkatan emisi CO₂ di atmosfer sangat berpengaruh terhadap perubahan iklim, dan hal itu dapat berdampak pada sektor-sektor ekonomi di Indonesia. Faktor-faktor yang dapat memengaruhi emisi CO₂ antara lain pertumbuhan ekonomi, penanaman modal asing, konsumsi listrik, dan ekspor batu bara, sehingga penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi pengaruh keempat variabel tersebut terhadap kualitas lingkungan di Indonesia, ditinjau dari tingkat emisi CO₂, tahun 1990-2020 dalam jangka pendek dan jangka panjang dengan regresi *Partial Adjustment Model* (PAM). Berdasarkan hasil regresi, diketahui bahwa dalam jangka pendek maupun jangka panjang, penanaman

modal asing dan ekspor batu bara tidak berpengaruh terhadap emisi CO₂, sedangkan pertumbuhan ekonomi berpengaruh positif dan konsumsi listrik berpengaruh negatif terhadap emisi CO₂ di Indonesia.

Pemerintah diharapkan meregulasi sektor-sektor penghasil emisi CO₂ tinggi untuk mulai menerapkan praktik operasional bisnis yang dapat menghasilkan emisi CO₂ yang lebih rendah. Mengingat bahayanya pengaruh perubahan iklim terhadap ketahanan pangan dan sektor ekonomi di Indonesia, pemerintah perlu mempertegas dan memperjelas regulasi terkait tanggung jawab lingkungan pada seluruh kegiatan ekonomi. Penanaman modal asing dengan asas keberlanjutan lingkungan seperti penggunaan teknologi dan pembangunan infrastruktur rendah emisi perlu ditingkatkan.

Keterbatasan penelitian ini terletak pada sampel penelitian yang hanya sampai tahun 2020 saja. Penelitian selanjutnya diharapkan mampu menggunakan sampel dengan data yang lebih baru serta menambahkan variabel lain yang lebih beragam untuk memberikan penjelasan terkait faktor-faktor yang mempengaruhi emisi CO₂, sehingga ancaman terkait perubahan iklim di masa depan dapat diminimalisasi.

Daftar Pustaka

- Agung, P. (2017). Pengaruh Urbanisasi terhadap Konsumsi Energi dan Emisi CO₂: Analisis Provinsi di Indonesia. *Jurnal Ekonomi Kuantitatif Terapan*, 1(2), 9–17.
- Aimon, H., Kurniadi, A. P., Sentosa, S. U., & Rahman, N. A. (2023). Production, Consumption, Export and Carbon Emission for Coal Commodities: Cases of Indonesia and Australia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 13(5), 484–492. <https://doi.org/10.32479/ijeep.14798>
- Bello, M. O., Solarin, S. A., & Yen, Y. Y. (2018). The impact of Electricity Consumption on CO₂ Emission, Carbon Footprint, Water Footprint and Ecological Footprint: The Role of Hydropower in an Emerging Economy. *Journal of Environmental Management*, 219, 218–230. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.101>
- Essandoh, O. K., Islam, M., & Kakinaka, M. (2020). Linking International Trade and Foreign Direct Investment to CO₂ Emissions: Any Differences Between Developed and Developing Countries. *Science of the Total Environment*, 712. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136437>
- Gujarati, D. N. & Porter, D. C. (2003). *Basic Econometrics*. New York: McGraw-Hill/Irwin.
- Hanafi, U. (2021). Dampak Pandemi Covid-19 terhadap Ekspor ASEAN: Pendekatan Panel Kointegrasi. *Journal of Trade Development and Studies*. 5(2), 168-182.
- Huang, Y., Chen, X., Zhu, H., Huang, C., & Tian, Z. (2019). The Heterogeneous Effects of FDI and Foreign Trade on CO₂ Emissions: Evidence from China. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019. 1-14. <https://doi.org/10.1155/2019/9612492>
- Hwang, J. H., & Yoo, S. H. (2014). Energy Consumption, CO₂ Emissions, and Economic Growth: Evidence from Indonesia. *Quality and Quantity*, 48(1), 63–73. <https://doi.org/10.1007/s11135-012-9749-5>
- Jiang, Q., Khattak, S. I., & Rahman, Z. U. (2021). Measuring The Simultaneous Effects of Electricity Consumption and Production on Carbon Dioxide Emissions (CO₂e) in China: New Evidence from an EKC-Based Assessment. *Energy*, 229, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120616>

- Kurniarahma, L., Laut, L. T., & Prasetyanto, P. K. (2020). Analisis Faktor-faktor yang Mempengaruhi Emisi CO₂ di Indonesia. *DINAMIC: Directory Journal of Economic*, 2(2), 368–385.
- Lægreid, O. M., & Povitkina, M. (2018). Do Political Institutions Moderate the GDP-CO₂ Relationship? *Ecological Economics*, 145, 441–450. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.11.014>
- Lean, H. H., & Smyth, R. (2010). CO₂ Emissions, Electricity Consumption and Output in ASEAN. *Applied Energy*, 87(6), 1858–1864. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.02.003>
- Lin, F. L., Inglesi-Lotz, R., & Chang, T. (2018). Revisit Coal Consumption, CO₂ Emissions and Economic Growth Nexus in China and India Using A Newly Developed Bootstrap ARDL Bound Test. *Energy Exploration and Exploitation*, 36(3), 450–463. <https://doi.org/10.1177/0144598717741031>
- Mendonça, A. K. S., Barni, G.A.C., Moro, M. F., Bornia, A. C., Kupek, E., & Fernandes, L. (2020). Hierarchical Modeling of the 50 Largest Economies to Verify The Impact of GDP, Population And Renewable Energy Generation In CO₂ Emissions. *Sustainable Production and Consumption*, 22, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.02.001>
- Mikayilov, J. I., Galeotti, M., & Hasanov, F. J. (2018). The Impact of Economic Growth on CO₂ Emissions in Azerbaijan. *Journal of Cleaner Production*, 197, 1558–1572.
- Nguyen, X. P., Hoang, A. T., Ölçer, A. I., & Huynh, T. T. (2021). Record Decline in Global CO₂ Emissions Prompted by COVID-19 Pandemic and Its Implications on Future Climate Change Policies. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1879969>
- Nurhayati, D., Dhokhikah, Y., & Mandala, M. (2020). Persepsi dan Strategi Adaptasi Masyarakat terhadap Perubahan Iklim di Kawasan Asia Tenggara. *Jurnal Proteksi: Jurnal Lingkungan Berkelanjutan*, 1(1), 39–44.
- Özcan Burcu, & Öztürk İlhan. (2019). Environmental Kuznets Curve (EKC): A Manual, 15-24.
- Prawira, B., Sarfiah, S. N., & Jalunggono, G. (2019). The Effect of Foreign Direct Investment (FDI), Export and Import on Indonesia's Economic Growth 1998-2017. *DINAMIC: Directory Journal of Economic*, 1(1), 1-10
- Rizki, C. A., & Anggaeni, P. W. (2022). Analisis Pengaruh Foreign Direct Investment, Penanaman Modal Dalam Negeri, dan Gross Domestic Product terhadap Emisi Karbon di Indonesia. *Journal of Development Economic and Social Studies*, 1(4), 529–538. <https://doi.org/DOI:10.21776/jdess.2022.01.4.03>
- Sarkodie, S. A., & Strezov, V. (2018). Assessment of Contribution of Australia's Energy Production to CO₂ Emissions and Environmental Degradation Using Statistical Dynamic Approach. *Science of the Total Environment*, 639, 888–899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.204>
- Shahbaz, M., Nasir, M. A., & Roubaud, D. (2018). Environmental Degradation in France: The Effects of FDI, Financial Development, and Energy Innovations. *Energy Economics*, 74, 843–857. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.07.020>
- Shahbaz, M., Uddin, G. S., Ur Rehman, I., & Imran, K. (2014). Industrialization, electricity consumption and CO₂ emissions in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 575–586. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.028>
- Stern, N. (2006). The Economics of Climate Change: The Stern Review. *World Economics* 7(2), 1-10
- Waheed, R., Chang, D., Sarwar, S., & Chen, W. (2018). Forest, Agriculture, Renewable Energy, and CO₂ Emission. *Journal of Cleaner Production*, 172, 4231–4238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.287>
- Wang, Y., & Huang, Y. (2022). Impact of Foreign Direct Investment on the Carbon Dioxide Emissions

of East Asian Countries Based on a Panel ARDL Method. *Frontiers in Environmental Science*,
10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.937837>

