

Pengaruh Energi Terbarukan Dan Adopsi Teknologi Terhadap Kualitas Udara Negara Berkembang Di Asia Tenggara

Iing Aprilia Laura¹, Joan Marta²

^{1,2} Program Studi Ekonomi Pembangunan Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Negeri Padang, Indonesia

*Korespondensi: iingapriliala6@gmail.com, joan@fe.unp.ac.id

Info Artikel

Diterima:

08 Agustus 2025

Disetujui:

15 Agustus 2025

Terbit daring:

17 Agustus 2025

DOI: -

Sitasi:

Laura, I.A. & Marta, J. (2025). Pengaruh Energi Terbarukan Dan Adopsi Teknologi Terhadap Kualitas Udara Negara Berkembang Di Asia Tenggara

Abstract:

This study aims to determine and analyze how renewable energy and technology adoption affect air quality in developing countries in Southeast Asia. This study uses secondary data sourced from the World Bank from 2000-2021 with research variables grouped into three parts: the dependent variable which in this study is defined as air quality, and the independent variables are renewable energy and technology adoption, and the control variables used in this study are economic openness, manufacturing sector, Gross Domestic Product (GDP), forest area and energy intensity. This study uses panel data regression analysis with a cross section of 5 developing countries in Southeast Asia and a time series from 2000-2021. The results of the study indicate that renewable energy and technological adoption have a negative effect on air quality as measured by carbon dioxide (CO₂) emission levels, thus providing an opportunity to reduce carbon dioxide (CO₂) emission levels in these countries.

Keywords: Air Quality, Renewable Energy, Technological Adoption, Panel Data Regression

Abstrak:

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan menganalisis bagaimana pengaruh energi terbarukan dan adopsi teknologi terhadap kualitas udara negara berkembang di Asia Tenggara. Penelitian ini menggunakan data sekunder yang bersumber dari World Bank tahun 2000-2021 dengan variabel penelitian yang dikelompokkan menjadi tiga bagian yaitu variabel terikat yang pada penelitian ini ditetapkan sebagai kualitas udara, dan variabel bebas yaitu energi terbarukan dan adopsi teknologi, serta variabel kontrol yang digunakan dalam penelitian ini yaitu keterbukaan ekonomi, sektor manufaktur, Produk Domestik Bruto (PDB), luas hutan dan intensitas energi. Penelitian ini menggunakan analisis regresi data panel dengan cross section 5 negara berkembang di Asia Tenggara dan times series dari tahun 2000-2021. Hasil penelitian menunjukkan bahwa energi terbarukan dan adopsi teknologi berpengaruh negatif terhadap kualitas udara yang diukur dalam tingkat emisi karbondioksida (CO₂), sehingga berpeluang mengurangi tingkat emisi karbondioksida (CO₂) di negara-negara tersebut.

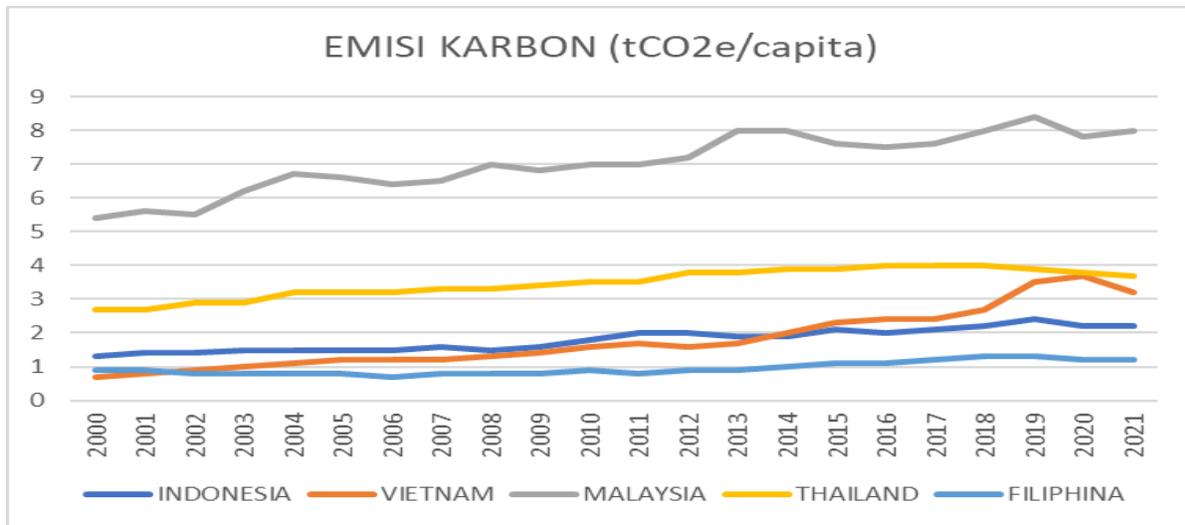
Kata Kunci: Kualitas Udara, Energi Terbarukan, Adopsi Teknologi, Regresi Data Panel

Kode Klasifikasi JEL: O14, O47, O33

PENDAHULUAN

Kualitas udara merupakan salah satu indikator penting dalam menilai kondisi lingkungan hidup dan kesehatan masyarakat. Udara yang bersih dan bebas dari polutan merupakan kebutuhan dasar yang menunjang kehidupan manusia. Berbagai aktivitas ekonomi dapat memberikan pengaruh buruk terhadap lingkungan, dan secara alamiah kegiatan manusia sehari-hari dapat menghasilkan Gas Rumah Kaca (GRK), dan akan mengalami peningkatan secara drastis yang disebabkan oleh majunya industri yang berbanding lurus dengan konsumsi energi (Anwar et al., 2020). Emisi karbondioksida (CO₂) sebagai kontributor utama dari Gas Rumah Kaca (GRK) adalah salah satu jenis emisi gas rumah kaca yang menjadi faktor utama timbulnya fenomena pemanasan global yang mengakibatkan terjadinya penurunan kualitas hidup, kesehatan dan lingkungan, serta suhu bumi yang terus meningkat. Revolusi industri yang dilakukan dalam skala besar telah mengakibatkan tingginya konsumsi bahan bakar fosil dan efek negatif yang ditimbulkan adalah peningkatan emisi karbon yang begitu cepat, sehingga menyebabkan pemanasan global yang parah (Ayati, 2023). Pemanasan global yang berdampak langsung terhadap kualitas udara menjadi ancaman besar bagi lingkungan dunia dan kesehatan masyarakat, karena dapat membahayakan keberlangsungan hidup bumi beserta dengan makhluk hidup yang ada di dalamnya, sehingga menjadi isu yang perlu diperhatikan pada saat ini.

Asia Tenggara merupakan salah satu wilayah yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim dan membutuhkan implementasi strategi dan mitigasi iklim yang efektif, karena kawasan ini memiliki keragaman geografis. Menurut laporan *Global Climate Risk Index* yang disusun oleh *Germanwatch*, sebuah kelompok lingkungan mengatakan bahwa Indonesia, Malaysia, Thailand dan Filipina termasuk diantara 10 negara di dunia yang paling terpengaruh oleh perubahan iklim yang tentunya telah berdampak pada kualitas udaranya dalam 20 tahun terakhir. Selain itu, Bank dunia juga menghitung Vietnam diantara lima negara yang paling mungkin terkena dampak pemanasan global dimasa depan. Menurut data *Global Carbon Atlas* (2022), emisi CO₂ di Asia Tenggara meningkat lebih dari dua kali lipat sejak tahun 2000, di mana negara-negara seperti Indonesia, Vietnam, dan Thailand menjadi kontributor utama. Hal ini sejalan dengan data dari *International Energy Agency* (IEA) yang memproyeksikan emisi karbon di negara-negara tersebut memiliki tren yang cenderung meningkat. Peningkatan tersebut juga sesuai dengan data yang ditunjukkan oleh World Bank. Hal tersebut menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi di kawasan tersebut belum sepenuhnya berorientasi pada prinsip ekonomi hijau (*green economy*). Oleh karena itu, dibutuhkan strategi inovatif dan teknologi ramah lingkungan guna menekan emisi tanpa menghambat pertumbuhan ekonomi.



Grafik 1.1 Emisi Karbon 5 Negara Berkembang Asia Tenggara Tahun 2000-2021

Sumber: World Bank

Berdasarkan grafik, Malaysia konsisten mencatat emisi karbon per kapita tertinggi di Kawasan tersebut, naik dari sekitar 5 tCO₂e/capita pada 2000 menjadi lebih dari 7 tCO₂e/capita hingga 2021. Ini mencerminkan tingginya industrialisasi dan konsumsi energi fosil. Thailand berada di posisi kedua, dengan tren peningkatan bertahap dari sekitar 3 tCO₂e/capita menjadi hampir 4 tCO₂e/capita, seiring pertumbuhan ekonominya. Vietnam menunjukkan lonjakan tajam, dari kurang dari 1 tCO₂e/capita pada 2000 menjadi puncaknya sekitar 3,7 tCO₂e/capita pada 2019–2020, mencerminkan proses industrialisasi yang pesat. Namun, terjadi sedikit penurunan pada 2021, diduga akibat dampak pandemi COVID-19. Indonesia mengalami kenaikan moderat dari sekitar 1 tCO₂e/capita menjadi 2 tCO₂e/capita, mencerminkan pertumbuhan ekonomi yang tidak terlalu bergantung pada sektor intensif karbon. Sementara itu, Filipina mencatat emisi paling rendah, stabil di kisaran 0,8 tCO₂e/capita hingga 1,2 tCO₂e/capita, diduga karena rendahnya tingkat industrialisasi dan peran energi terbarukan.

Dalam menghadapi tantangan ini, energi terbarukan muncul dianggap sebagai solusi strategis terhadap krisis ini. Saidi dan Omri (2020) mengemukakan bahwa penggunaan energi terbarukan oleh masyarakat secara efektif dapat menurunkan tingkat emisi gas karbondioksida (CO₂) di 15 negara dunia. Hal ini sejalan dengan penelitian Yazdi dan Shakouri (2018) dalam penelitiannya menyatakan, bahwa penggunaan energi terbarukan di kawasan Eropa secara efektif dapat menurunkan tingkat emisi karbon. Penggunaan energi terbarukan kini sudah dikenal banyak oleh masyarakat global. Karena secara empiris, penggunaan energi terbarukan dapat menekankan emisi karbon yang menjadi penyebab utama pemanasan global yang berdampak buruk pada kualitas udara. Negara-negara berkembang di Asia Tenggara memiliki potensi besar dalam pengembangan energi terbarukan. Wilayah ini diberkahi dengan sumber daya alam yang melimpah, seperti radiasi matahari sepanjang tahun dan aliran sungai yang kuat, yang sangat mendukung pengembangan teknologi energi surya, tenaga air, dan bioenergi. Selain dianggap dapat mengurangi emisi karbon, penerapan energi terbarukan juga dapat memberikan manfaat tambahan seperti diversifikasi sumber energi, peningkatan ketahanan energi, dan penciptaan lapangan kerja hijau.

Selain energi terbarukan, adopsi teknologi khususnya dalam sektor teknologi informasi dan komunikasi (ICT) juga dianggap menjadi solusi strategis dalam menghadapi peningkatan CO₂. Ekspor ICT sebagai indikator adopsi teknologi tidak hanya mencerminkan kemampuan

teknologi suatu negara, tetapi juga menggambarkan potensi adopsi teknologi bersih dalam sistem produksi dan konsumsi domestik. Penelitian oleh You dan Lv (2018) menunjukkan bahwa ekspor *ICT* di negara berkembang memiliki kecenderungan meningkatkan emisi CO₂ karena proses produksi dan distribusinya masih belum efisien secara energi. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh *ICT export* terhadap kualitas udara akan sangat bergantung pada struktur energi, adopsi teknologi hijau, dan arah kebijakan industrinya. Selain itu, Khan et al. (2022) menemukan bahwa hubungan antara *ICT export* dan emisi CO₂ bersifat non-linear. Pada tahap awal industrialisasi digital, peningkatan ekspor *ICT* cenderung menaikkan emisi karena peningkatan permintaan energi dan logistik. Namun, dalam jangka panjang, ketika teknologi dan infrastruktur digital telah berkembang, serta negara mulai beralih ke energi terbarukan, ekspor *ICT* justru berkontribusi dalam penurunan emisi melalui efisiensi dan inovasi teknologi.

Teori Environmental Kuznets Curve (EKC)

Kurva *Environmental Kuznets Curve (EKC)* merupakan model yang menjelaskan hubungan antara tingkat pendapatan suatu negara dengan tingkat pencemaran lingkungannya. Dalam model konvensional, EKC berbentuk kurva terbalik seperti huruf U (*inverted U-shape*), menunjukkan bahwa pada tahap awal pertumbuhan ekonomi, pencemaran meningkat, namun setelah melewati tingkat pendapatan tertentu, pencemaran mulai menurun.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif deskriptif dan induktif. Analisis dalam penelitian ini menggunakan *Stata 17*, disertai dengan analisis statistik atau kuantitatif untuk menguji hipotesis. Sumber data penelitian ini berasal dari World Bank. Penelitian ini menggunakan data panel, dengan fokus pada 5 negara berkembang di Asia Tenggara sebagai data cross-section dan time series dari tahun 2000 hingga 2021.

Analisis dilakukan dengan pendekatan data panel dengan persamaan sebagai berikut ini:

$$CO_{2it} = \beta_0 + \beta_1(EBT)_{it} + \beta_2(IT)_{it} + \beta_3(KBE)_{it} + \beta_4(SM)_{it} + \beta_5(PDB)_{it} + \beta_6(LH)_{it} + \beta_7(EIP)_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Dimana : CO₂ adalah emisi karbondioksida, EBT adalah energi terbarukan, IT adalah Adopsi Teknologi, KBE adalah keterbukaan ekonomi, SM adalah sektor manufaktur, Lh adalah Luas Hutan, dan EIP adalah intensitas energi. Serta, ε adalah *error term*.

Sebelum estimasi dilakukan, terlebih dahulu ditentukan model panel data terbaik melalui beberapa uji pemilihan model. Uji Chow digunakan untuk membandingkan model common effects dengan fixed effects, uji Hausman untuk membandingkan model fixed effects dan random effects.

Jika model yang terpilih adalah fixed effects atau common effects, maka dilakukan uji asumsi klasik. Selanjutnya, dilakukan uji t untuk menganalisis pengaruh parsial masing-masing variabel independen terhadap variabel dependen, uji F untuk melihat pengaruh simultan, serta analisis koefisien determinasi untuk mengetahui sejauh mana variasi pada variabel dependen dapat dijelaskan oleh model.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Deskriptif

Tabel 1.1 Deskriptif Statistik Data Panel

| Variabel | | Mean | Std. Dev | Min | Max | Observation |
|-----------|---------|----------|-----------|-----------|----------|--------------|
| CO2 | overall | 3.100283 | 2.308986 | 0.7325283 | 8.19206 | N = 110 |
| | between | | 2.500178 | 0.992558 | 7.246028 | n = 5 |
| | within | | 0.5336935 | 1.548293 | 4.824205 | T = 22 |
| EBT | overall | 25.62818 | 13.69114 | 2 | 57.7 | N = 110 |
| | between | | 13.48143 | 3.809091 | 37.39545 | n = 5 |
| | within | | 6.38076 | 7.132727 | 45.93273 | T = 22 |
| ICTexport | overall | 23.68935 | 15.03916 | 2.66 | 52.68 | N = 107 |
| | between | | 14.15627 | 4.769474 | 38.18 | n = 5 |
| | within | | 8.346325 | 8.249346 | 45.76889 | T-bar = 21.4 |
| KBE | overall | 109.7178 | 46.95242 | 32.97218 | 220.4068 | N = 110 |
| | between | | 47.72252 | 50.40956 | 163.7845 | n = 5 |
| | within | | 19.12755 | 62.72154 | 166.3401 | T = 22 |
| SM | overall | 4.958765 | 5.226798 | -21.83876 | 18.31249 | N = 109 |
| | between | | 1.992612 | 3.275265 | 8.374481 | n = 5 |
| | within | | 4.908342 | -25.25447 | 18.44493 | T-bar = 21.8 |
| PDB | overall | 5.925341 | 1.294852 | 4.393418 | 7.715071 | N = 110 |
| | between | | 1.436643 | 4.513891 | 7.505721 | n = 5 |
| | within | | 0.101676 | 5.692155 | 6.134691 | T = 22 |
| LH | overall | 43.17006 | 12.13604 | 22.939 | 59.9341 | N = 110 |
| | between | | 13.39376 | 23.68369 | 58.65138 | n = 5 |
| | within | | 1.566087 | 38.21977 | 47.29724 | T = 22 |
| EIP | overall | 4.326 | 0.8597089 | 2.66 | 5.85 | N = 110 |
| | between | | 0.7513474 | 3.302727 | 5.162273 | n = 5 |
| | within | | 0.5322949 | 3.223273 | 5.703273 | T = 22 |

Sumber : output stata (data diolah)

Berdasarkan tabel 1.1 yang merupakan hasil analisis deskriptif menunjukkan bahwa emisi karbondioksida (CO₂) memiliki nilai rata-rata sebesar 3,100 dengan nilai minimum 0,73 dan maksimum mencapai 8,19. Nilai standar deviasi sebesar 2,31 menunjukkan adanya penyebaran data yang cukup besar, yang mencerminkan perbedaan signifikan dalam tingkat emisi antar negara. Tingginya nilai maksimum menunjukkan bahwa terdapat negara dengan tingkat polusi udara yang jauh lebih tinggi, yang mungkin disebabkan oleh ketergantungan pada energi fosil atau tingkat industrialisasi yang intensif.

Sementara itu, konsumsi Energi Terbarukan (EBT) sebagai persentase dari total konsumsi energi menunjukkan rata-rata sebesar 25,63 , dengan nilai minimum 2 dan maksimum 57,7. Nilai rata-rata yang cukup tinggi mengindikasikan bahwa sebagian besar negara telah mulai mengadopsi sumber energi alternatif. Namun, nilai standar deviasi yang tinggi sebesar 13,70 mencerminkan ketimpangan pemanfaatan energi bersih antar negara. Negara dengan nilai maksimum mendekati 100% kemungkinan telah mengintegrasikan sumber energi terbarukan secara dominan dalam sistem energinya, sementara negara dengan nilai rendah masih bergantung besar pada energi konvensional.

Selanjutnya, variabel adopsi teknologi (ICT export) yang mencerminkan tingkat adopsi teknologi memiliki rata-rata sebesar 23,69, dengan nilai minimum 2,66 dan maksimum 52,68. Standar deviasi sebesar 15,04 menunjukkan adanya perbedaan yang cukup lebar antara negara yang sudah maju secara digital dan negara yang masih memiliki keterbatasan dalam ekspor teknologi. Semakin tinggi kontribusi ekspor ICT, maka semakin besar pula peluang penerapan teknologi efisien dan ramah lingkungan, yang secara tidak langsung dapat berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon.

Keterbukaan Ekonomi (KBE) yang diukur melalui rasio perdagangan terhadap PDB menunjukkan rata-rata sebesar 109,72, dengan nilai minimum 32,97 dan maksimum 220,41. Standar deviasi yang tinggi (46,95) mengindikasikan bahwa integrasi negara-negara dalam perdagangan internasional sangat bervariasi. Negara dengan rasio perdagangan yang tinggi umumnya memiliki ekonomi yang lebih terbuka, namun konsekuensinya terhadap lingkungan sangat bergantung pada komposisi perdagangan dan sektor industri yang dominan.

Pada Sektor Manufaktur (SM), pertumbuhan tahunan tercatat rata-rata sebesar 4,96, dengan nilai minimum -21,84 dan maksimum 18,31. Nilai negatif pada minimum menunjukkan adanya kontraksi di beberapa negara atau tahun tertentu, yang bisa disebabkan oleh krisis ekonomi atau perubahan kebijakan industri. Namun, secara umum sektor manufaktur tetap mengalami pertumbuhan positif, yang tentunya memiliki implikasi terhadap peningkatan emisi apabila tidak dibarengi dengan inovasi bersih.

Produk Domestik Bruto (PDB) mencerminkan tingkat aktivitas ekonomi masing-masing negara. Dengan rata-rata sebesar 5,925, minimum 4,393 dan maksimum mencapai 7,715, dapat dilihat bahwa terdapat kesenjangan skala ekonomi yang cukup besar antar negara di kawasan ini. Negara dengan PDB besar umumnya memiliki kapasitas produksi dan konsumsi energi yang lebih tinggi, yang berpotensi mempengaruhi kualitas udara.

Luas Hutan (LH) sebagai persentase dari total daratan menunjukkan rata-rata sebesar 43,17, dengan nilai minimum 22,94 dan maksimum 59,93. Standar deviasi sebesar 12,15 menunjukkan adanya variasi dalam kemampuan negara untuk menjaga tutupan hutannya. Negara dengan persentase luas hutan yang tinggi berperan penting dalam menyerap emisi karbon, yang pada akhirnya dapat memperbaiki kualitas udara.

Terakhir, intensitas energi (EIP) dengan indikator intensitas energi primer yang menggambarkan rasio jumlah konsumsi energi primer dengan output ekonomi menunjukkan rata-rata sebesar 4,32 dengan nilai minimum 2,66 dan maksimum 5,85, sedangkan standar deviasi sebesar 0,859 menunjukkan bahwa intensitas energi di kawasan Asia Tenggara relatif stabil dalam masing-masing negara sepanjang periode pengamatan, namun terdapat heterogenitas antar negara yang cukup jelas. Dengan demikian, perbedaan efisiensi energi dan kebijakan pengelolaan energi di tiap negara menjadi faktor yang berkontribusi terhadap variasi tersebut

Analisis Induktif

Tabel 1.2 (Hasil Uji Pemilihan Model)

| Uji Panel | F Stat | Chi Stat | P Value | Kesimpulan |
|-----------|--------|----------|---------|--|
| Chow | 72.95 | | 0.0000 | Fixed Effect lebih sesuai dibandingkan Common Effect |
| Hausman | | 815.60 | 0.0000 | Fixed Effect lebih sesuai dibandingkan Random Effect |

Sumber: hasil olahan data Stata 17

Berdasarkan hasil uji pemilihan model, model yang paling sesuai adalah fixed effects. Uji asumsi klasik menunjukkan tidak adanya multikolinearitas dengan nilai VIF sebesar 4.87, yang tidak melampaui batas umum 10. Hal ini mencerminkan bahwa hubungan antar variabel independen cukup bebas satu sama lain dan tidak saling mempengaruhi secara linear yang tinggi.

Selanjutnya hasil uji Modified Wald menunjukkan adanya masalah heteroskedastisitas dan uji Wooldridge menunjukkan adanya masalah autokorelasi. Untuk mengatasi masalah ini, digunakan estimasi regresi robust standard error agar estimasi parameter tetap efisien dan tidak bias (Hoechle, 2007; Wooldridge, 2012).

Tabel 1.3 Hasil Estimasi *Fixed Effect Model* dengan Robust

| Variable | Coefficient | Robust Std. Error | t-Statistic | Prob |
|----------------|--------------|-------------------|-------------|-------|
| EBT | -0.0296908** | 0.0074588 | -3.98 | 0.001 |
| ICT Export | -0.0092881* | 0.0052336 | -1.77 | 0.090 |
| KBE | -0.0086092** | 0.0035567 | -2.42 | 0.025 |
| SM | 0.0106308** | 0.0043695 | 2.43 | 0.024 |
| PDB | 5.826013*** | 0.8508219 | 6.85 | 0.000 |
| LH | 0.0142297 | 0.0435924 | 0.33 | 0.747 |
| EIP | 0.7934531*** | 0.1535248 | 5.17 | 0.000 |
| Constanta | -33.33398 | 4.227961 | -7.88 | 0.000 |
| R ² | | | 0.8445 | |
| F-Statistik | | | 110.54 | |
| Prob > F | | | 0.0000 | |

Sumber: hasil olahan data Stata 17

Keterangan Signifikansi :

***Signifikan pada tingkat 1% ($p < 0.01$)

**Signifikan pada Tingkat 5% ($p < 0.05$)

*Signifikan pada Tingkat 10% ($p < 0.10$)

Hasil estimasi diatas dapat dijelaskan melalui persamaan berikut:

$$CO2_{it} = -33.33398_{it} + (-0.029)EBT_{it} + (-0.009)IT_{it} + (-0.008)KBE_{it} + (0.010)SM_{it} + (5.826)PDB_{it} + (0.0142)LH_{it} + (0.793)EIP_{it} \quad (2)$$

Hasil estimasi menunjukkan bahwa energi terbarukan berpengaruh negatif signifikan terhadap emisi CO₂ dengan koefisien sebesar -0.0296908 dan nilai p-value sebesar 0.000, yang berarti bahwa peningkatan penggunaan energi terbarukan dapat menurunkan emisi karbon secara signifikan. Demikian pula, variabel *ICT export* juga menunjukkan pengaruh negatif signifikan pada Tingkat 10% terhadap emisi CO₂ dengan koefisien -0.0092881 dan p-value sebesar 0.090, yang mengindikasikan bahwa peningkatan ekspor teknologi informasi dan komunikasi turut berperan dalam pengurangan emisi. Serta, variabel kontrol meliputi keterbukaan ekonomi juga berpengaruh negatif signifikan terhadap emisi CO₂ dengan koefisien sebesar -0.0086092 dan p-value 0.025. Sedangkan, sektor manufaktur menunjukkan pengaruh positif signifikan terhadap emisi CO₂, dengan nilai koefisien sebesar 0.0106308 dan p-value sebesar 0.024. Hal serupa juga ditunjukkan oleh variabel Produk Domestik Bruto (PDB) yang memberikan pengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂, dengan koefisien 5.826013 dan p-value sebesar 0.000, menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi cenderung mendorong peningkatan emisi. Sedangkan, variabel luas hutan menunjukkan hasil yang tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap emisi CO₂ dengan koefisien 0.0142297 dan p-value sebesar 0.747. Variabel kontrol terakhir yaitu, intensitas energi menunjukkan hasil positif signifikan terhadap emisi CO₂ dengan koefisien sebesar 0.7934531 dan nilai p-value sebesar 0.000.

Pengaruh Energi Terbarukan Terhadap Kualitas Udara Negara Berkembang di Asia Tenggara

Hasil estimasi dan uji hipotesis, menunjukkan bahwa temuan bahwa variabel energi terbarukan memberikan pengaruh negatif dan signifikan terhadap tingkat emisi karbon dioksida (CO₂) di negara-negara berkembang kawasan Asia Tenggara.

Temuan ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Raihan, Ibrahim, dan Muhtasim (2023), yang menunjukkan bahwa konsumsi energi terbarukan mampu menurunkan CO₂, dimana energi terbarukan tidak memiliki hubungan kausal langsung terhadap emisi CO₂, namun memiliki dampak negatif yang signifikan secara statistik.

Demikian juga, penelitian oleh Bui Minh, Nguyen Ngoc, dan Bui Van (2023), menjelaskan bahwa konsumsi energi terbarukan terbukti secara signifikan mampu menurunkan CO₂ baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang.

Pengaruh Adopsi Teknologi Terhadap Kualitas Udara Negara Berkembang di Asia Tenggara

Berdasarkan hasil analisis data dan uji hipotesis yang dilakukan dalam penelitian ini, ditemukan bahwa variabel Adopsi teknologi memiliki pengaruh negatif dan signifikan terhadap kualitas udara di negara-negara berkembang kawasan Asia Tenggara. Artinya, semakin tinggi tingkat adopsi teknologi yang dikembangkan oleh negara-negara tersebut, maka kualitas udara cenderung membaik, ditunjukkan dengan menurunnya tingkat emisi karbon dioksida (CO₂).

Sejalan dengan hasil tersebut, penelitian oleh Hazwan Haini (2021) menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi ICT mampu meningkatkan efisiensi energi dan mendorong adopsi teknologi ramah lingkungan, sehingga berdampak positif terhadap kualitas udar

Pengaruh Energi Terbarukan, Inovasi Teknologi, dan Variabel Kontrol Secara Bersama-sama Terhadap Kualitas Udara Negara Berkembang di Asia Tenggara

Berdasarkan hasil analisis serta uji hipotesis yang telah dilakukan, diperoleh temuan bahwa variabel energi terbarukan, adopsi teknologi, serta variabel kontrol lainnya yang meliputi keterbukaan ekonomi, sektor manufaktur, produk domestik bruto (PDB), luas hutan dan intensitas energi secara simultan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap tingkat emisi karbon di negara-negara berkembang kawasan Asia Tenggara.

SIMPULAN

Berdasarkan penelitian ini, disimpulkan bahwa energi terbarukan berpengaruh signifikan negatif terhadap emisi karbon di negara berkembang Asia Tenggara. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar proporsi energi terbarukan dalam total konsumsi energi, maka emisi karbon (CO₂) cenderung menurun. Energi terbarukan berperan penting dalam mendukung upaya transisi energi bersih dan pengurangan pencemaran udara. Adopsi teknologi juga menunjukkan pengaruh signifikan negatif terhadap emisi karbon. Hal ini berarti bahwa peningkatan adopsi teknologi mampu mendorong efisiensi energi dan produksi, serta mengurangi intensitas emisi karbon dari aktivitas ekonomi. Kemudian, energi terbarukan dan adopsi teknologi serta variabel kontrol yang meliputi keterbukaan ekonomi, sektor manufaktur, PDB, luas hutan, dan intensitas energi secara bersama-sama berpengaruh signifikan terhadap emisi karbon. Artinya, kualitas udara di kawasan ini merupakan hasil dari interaksi banyak faktor ekonomi, lingkungan, dan teknologi.

REFERENSI

- Adebayo, T. S. (2020). CO₂ emissions and air pollution in emerging economies: Evidence from panel cointegration and causality tests. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(6), 6529–6540.
- Ayati, D. (2023). *Analisis determinasi pada emisi CO₂ di kawasan ASEAN tahun 2010–2021*. Universitas Tidar.
- Fasikha, Y., & Yuliadi, I. (2018). Analisis pengaruh perubahan lingkungan terhadap pendapatan per kapita di negara-negara ASEAN periode 2005–2015. *Journal of Economics Research and Social Sciences*, 2(1), 34–43.
- Global Carbon Atlas. (2022). CO₂ emissions.
- Hoechle, D. (2007). Robust standard errors for panel regressions with cross-sectional dependence. In *The Stata Journal* (Vol. 7, Issue 3).
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- Khan, H., Zhao, X., & Khan, I. (2022). ICT diffusion and CO₂ emissions nexus in emerging economies: New evidence using panel smooth transition regression model. *Technology in Society*, 68, 101859.

- OECD. (2019). *OECD science, technology and innovation outlook 2018: Adapting to technological and societal disruption*. OECD Publishing.
- Panayotou, T. (1993). *Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development*. International Labour Organization.
- Raihan, A., Ibrahim, S., & Muhtasim, D. A. (2023). Dynamic impacts of economic growth, energy use, tourism, and agricultural productivity on carbon dioxide emissions in Egypt. *World Development Sustainability*, 2, 100059.
- Saidi, K., & Omri, A. (2020). The impact of renewable energy on carbon emissions and economic growth in 15 major renewable energy-consuming countries. *Environmental Research*, 186, 109567.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- World Bank. (2022). *World development indicators*.
- World Intellectual Property Organization. (2022). *World intellectual property indicators 2022*.
- World Resources Institute. (2019). *CO₂ emissions from fossil fuels and cement production*.
- Yazdi, S. K., & Shakouri, B. (2018). The relationship between renewable energy consumption and CO₂ emissions: Evidence from developing countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 24895–24905.
- You, W., & Lv, Z. (2018). Spillover effects of economic globalization on CO₂ emissions: A spatial panel approach. *Energy Economics*, 73, 248–257.