

PENGARUH MOBILITAS PENDUDUK DAN INDIKATOR SOSIAL EKONOMI TERHADAP EMISI KARBON DI INDONESIA TAHUN 2020-2022

Agustin Kurniasari¹⁾, Dara Sakina¹⁾, Muhammad Afif Wirdiyan Zaldi¹⁾, Robert Kurniawan^{1*)}

¹⁾Politeknik Statistika STIS, Jakarta, Indonesia

*Korespondensi: robertk@stis.ac.id

Abstrak

Indonesia merupakan salah satu penyumbang emisi karbon terbesar di dunia, terutama dari sektor transportasi darat berbahan bakar fosil. Pandemi COVID-19 menunjukkan bahwa penurunan mobilitas dapat menurunkan emisi secara signifikan, terutama di wilayah padat penduduk dengan sistem transportasi publik yang belum optimal. Selain itu, ketimpangan distribusi penduduk dan perbedaan karakteristik sosial ekonomi antardaerah menyebabkan tekanan lingkungan yang bervariasi di seluruh wilayah Indonesia. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh mobilitas penduduk dan indikator sosial-ekonomi terhadap emisi karbon (CO) di Indonesia selama periode unik pandemi 2020-2022. Metode yang digunakan adalah regresi data panel dengan *Random Effect Model*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mobilitas ke tempat kerja dan toko, pertumbuhan ekonomi, serta tingkat kemiskinan berpengaruh negatif signifikan terhadap emisi. Sebaliknya, mobilitas di area permukiman dan kepadatan penduduk berpengaruh positif signifikan. Variabel mobilitas ke stasiun dan Penanaman Modal Asing (PMA) tidak ditemukan signifikan. Temuan ini menunjukkan perlunya kebijakan transportasi rendah emisi dan efisiensi energi rumah tangga yang responsif terhadap dinamika mobilitas dan karakteristik sosial-ekonomi masyarakat.

Kata kunci: Emisi Karbon, Mobilitas Penduduk, Sosial-Ekonomi, Data Panel, Indonesia

Abstract

Indonesia is one of the world's largest contributors to carbon emissions, primarily from the fossil-fueled land transportation sector. The COVID-19 pandemic demonstrated that a reduction in mobility could significantly decrease emissions, especially in densely populated areas with suboptimal public transportation systems. In addition, inequality in population distribution and differences in socioeconomic characteristics between regions lead to environmental pressures that vary across Indonesia. This study aims to analyze the impact of population mobility and socio-economic indicators on carbon monoxide (CO) emissions in Indonesia during the unique pandemic period of 2020-2022. The method used is the Random Effect Model for panel data regression. The results show that mobility to workplaces and stores, economic growth, and poverty levels have a significant negative effect on emissions. Conversely, mobility in residential areas and population density have a significant positive effect. The variables of mobility to transit stations and Foreign Direct Investment (FDI) were found to be not significant. These findings point to the need for low-emission transportation and household energy efficiency policies that are responsive to mobility dynamics and socio-economic characteristics of the community.

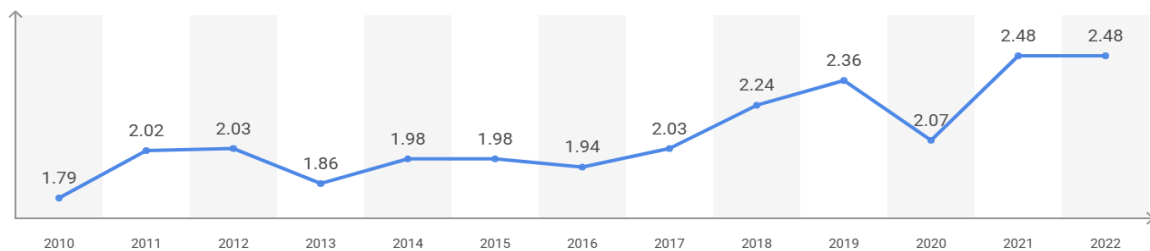
Keywords: Carbon Emissions, Population Mobility, Socio-Economic, Panel Data, Indonesia

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim dan pemanasan global merupakan isu krusial di abad ke-21 karena telah menimbulkan kerusakan ekosistem serta meningkatkan risiko kesehatan manusia. Laporan Intergovernmental Panel on Climate Change (2022) menegaskan bahwa perubahan iklim akibat aktivitas manusia telah menyebabkan dampak merugikan yang meluas dan mengarah pada kerugian yang semakin sulit dipulihkan. Salah satu indikator utama dari perubahan tersebut

adalah meningkatnya emisi karbon, termasuk gas karbon monoksida (CO), yang menjadi penyumbang signifikan terhadap polusi udara dan efek rumah kaca.

Indonesia sendiri merupakan salah satu negara penghasil emisi karbon terbesar di dunia. Berdasarkan data World Population Review (2023), Indonesia menghasilkan sekitar 675 juta ton CO atau sekitar 1,73% dari total emisi global, menempatkannya sebagai negara penghasil emisi tahunan terbesar ke-7 di dunia. Tren peningkatan emisi ini telah berlangsung sejak 2010, sebagaimana terlihat dalam Gambar 1.



Sumber: World Population Review, 2023 (Data Diolah)

Gambar 1. Perkembangan Emisi CO di Indonesia, 2010-2022

Menurut Statista (2024), Sektor transportasi menjadi salah satu penyumbang utama emisi karbon di Indonesia. Menurut WRI (2024), sektor ini menyumbang sekitar 27% dari total emisi gas rumah kaca nasional berbasis energi, dengan transportasi darat mendominasi hingga 90% konsumsi energi sektor transportasi. Hal ini menunjukkan bahwa mobilitas penduduk, khususnya penggunaan kendaraan berbahan bakar fosil, memiliki peran besar dalam peningkatan emisi karbon.

Pandemi COVID-19 memberikan momen evaluasi yang unik terhadap dampak aktivitas manusia terhadap lingkungan. Menurut Sekjen Dewan Energi Nasional, pandemi menyebabkan penurunan emisi karbon sekitar 59 juta ton CO₂ pada tahun 2020, turun dari 638 juta ton pada 2019 menjadi 579 juta ton. Penurunan ini terutama disebabkan oleh berkurangnya mobilitas masyarakat serta aktivitas industri dan komersial. Data Mobility (2022) menunjukkan bahwa selama masa pembatasan sosial, mobilitas masyarakat Indonesia ke stasiun transportasi publik dan tempat kerja turun drastis hingga 40–60% dibandingkan kondisi normal, mencerminkan penurunan aktivitas transportasi yang signifikan secara nasional. Fakta ini memperlihatkan betapa eratnya kaitan antara mobilitas penduduk dan kualitas lingkungan.

Kondisi ini semakin kompleks ketika dikaitkan dengan tingginya kepadatan penduduk. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (2021), DKI Jakarta mencatat kepadatan tertinggi di Indonesia dengan 16.158 jiwa per km², disusul oleh Banten dan Jawa Barat. Kepadatan ini

mendorong tingginya intensitas mobilitas dan konsumsi bahan bakar, yang pada akhirnya meningkatkan emisi karbon. Penelitian Kurniawan et al. (2025) juga menunjukkan bahwa kawasan perkotaan dengan tingkat kemacetan tinggi, aktivitas industri padat, dan minim ruang terbuka hijau memiliki kerentanan yang lebih besar terhadap penurunan kualitas udara.

Faktor sosial-ekonomi seperti kemiskinan, pertumbuhan ekonomi, dan Penanaman Modal Asing (PMA) juga memiliki keterkaitan erat dengan degradasi lingkungan. (Khan, 2021) menyatakan bahwa kemiskinan berhubungan dengan peningkatan jejak ekologis karena masyarakat miskin cenderung menggunakan sumber energi tradisional yang lebih mencemari lingkungan. Pada saat yang sama, pertumbuhan ekonomi Indonesia masih bertumpu pada energi fosil, khususnya batu bara, yang mendominasi bauran energi nasional dan memperlambat transisi menuju energi rendah karbon (Institute for Essential Services Reform, 2023). Dari sisi investasi, laporan United Nations Conference on Trade and Development (2022) menyoroti bahwa peningkatan investasi asing langsung (FDI), terutama di sektor ekstraktif dan industri berat, berpotensi memperburuk dampak lingkungan apabila tidak diimbangi dengan regulasi yang ketat. Bukti empiris dari penelitian Wang et al. (2025), Wu & Wan (2024), Yu & Liu (2022), dan Pham et al. (2025) turut menunjukkan bahwa kepadatan penduduk, pertumbuhan ekonomi, kemiskinan, dan PMA memiliki pengaruh kompleks terhadap peningkatan maupun penurunan emisi karbon tergantung konteksnya.

Dari perspektif perilaku, Behavioral Environmental Theory (Stern, 2000) menjelaskan bahwa perilaku manusia berdampak pada lingkungan melalui konsumsi energi, perubahan struktur ekosistem, dan penggunaan material. Salah satu indikator perilaku tersebut adalah *mobility index*, yang menunjukkan perubahan aktivitas masyarakat di lokasi seperti tempat kerja, pusat perbelanjaan, taman, stasiun, dan area permukiman. Abu-Rayash & Dincer (2020) menyatakan bahwa semakin tinggi *mobility index*, semakin besar potensi peningkatan emisi CO akibat naiknya penggunaan kendaraan bermotor berbahan bakar fosil. Hal ini diperkuat dengan temuan Arisanti et al. (2024) yang menyatakan bahwa mobilitas ke toko dan tempat kerja selama pandemi memiliki pengaruh negatif signifikan terhadap emisi karbon, sedangkan mobilitas ke stasiun tidak signifikan. Selain itu, studi yang dilakukan Le Quéré et al. (2020) juga menemukan bahwa emisi dari aktivitas rumah tangga selama masa karantina mengalami peningkatan.

Dalam mengkaji hubungan berbagai faktor sosial-ekonomi dengan emisi karbon, penelitian ini menggunakan pendekatan STIRPAT (Dietz & Rosa, 1994), yang merupakan perluasan model IPAT dan memungkinkan analisis empiris secara kuantitatif. Meskipun model ini banyak

digunakan secara global, penelitian yang secara khusus meneliti hubungan antara mobilitas penduduk, variabel sosial-ekonomi, dan emisi karbon di Indonesia masih terbatas, terutama pada periode 2020–2022 yang merupakan masa unik akibat pandemi COVID-19. Periode ini memberikan peluang untuk memahami bagaimana perubahan perilaku dan aktivitas ekonomi memengaruhi emisi karbon secara signifikan. Berdasarkan kondisi tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis pengaruh indeks mobilitas penduduk, kepadatan penduduk, tingkat kemiskinan, pertumbuhan ekonomi, dan Penanaman Modal Asing (PMA) terhadap emisi karbon di Indonesia selama 2020–2022, dengan harapan dapat memberikan kontribusi bagi upaya perencanaan pembangunan rendah karbon dan pengelolaan transportasi yang lebih berkelanjutan.

2. METODE PENELITIAN

2.1 DATA DAN SUMBER DATA

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data panel dari 34 provinsi pada tahun 2020–2022. Variabel dependen yang digunakan adalah emisi karbon monoksida, sedangkan variabel independen dilihat dari *mobility index* dan indikator sosial ekonomi yang tertera pada Tabel 1. Data diolah dengan menggunakan *software* Eviews12.

Tabel 1. Variabel Penelitian

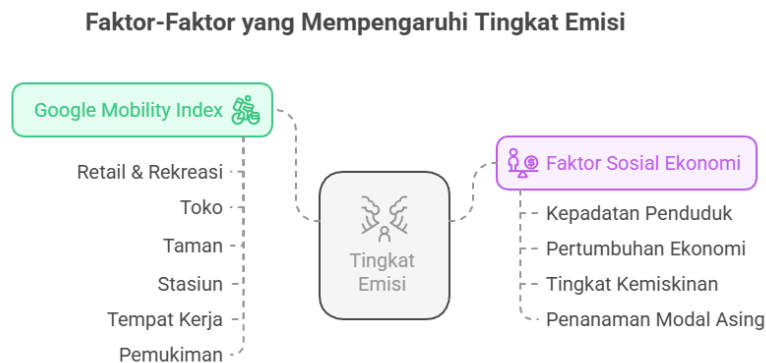
Variabel	Deskripsi	Satuan	Sumber	Referensi
CO	Emisi Karbon Monoksida	Mol/km^2	<i>Google Earth Engine (GEE)</i>	Arisanti et al. (2024)
<i>Google Mobility Index</i>				
Toko	Pergerakan ke tempat-tempat yang menjual kebutuhan pokok, seperti: <ul style="list-style-type: none"> • Pasar swalayan dan toko kelontong • Pasar tradisional • Toko makanan khusus • Apotek dan toko obat 	Persentase	<i>Google Community Mobility Reports</i>	Arisanti et al. (2024)
Permukiman	Durasi waktu yang dihabiskan orang di rumah atau area tempat tinggal mereka.	Persentase	<i>Google Community Mobility Reports</i>	Arisanti et al. (2024)

Stasiun	Mengukur lalu lintas di pusat- pusat transportasi publik, contohnya: <ul style="list-style-type: none"> ● Stasiun kereta bawah tanah (MRT) ● Terminal bus ● Stasiun kereta api 	Persentase	<i>Google Community Mobility Reports</i>	Arisanti et al. (2024)
Tempat Kerja	Tren pergerakan ke lokasi- lokasi yang merupakan tempat kerja.	Persentase	<i>Google Community Mobility Reports</i>	Arisanti et al. (2024)
Retail dan Rekreasi	Mengukur tren kunjungan ke tempat-tempat seperti: <ul style="list-style-type: none"> ● Restoran dan kafe ● Pusat perbelanjaan (mal) ● Taman hiburan ● Museum, perpustakaan, dan bioskop 	Persentase	<i>Google Community Mobility Reports</i>	Arisanti et al. (2024)
Taman	Melacak kunjungan ke ruang terbuka publik, yang meliputi: <ul style="list-style-type: none"> ● Taman nasional dan taman kota ● Pantai umum ● Plaza dan alun-alun ● Taman anjing dan kebun raya 	Persentase	<i>Google Community Mobility Reports</i>	Arisanti et al. (2024)
Sosial Ekonomi				
PE	Pertumbuhan ekonomi	Persentase	Badan Pusat Statistik	Wu & Wan (2024)
P0	Tingkat kemiskinan	Persentase	Badan Pusat Statistik	Yu & Liu (2022)
Kepadatan	Kepadatan penduduk	<i>Jiwa /km²</i>	Badan Pusat Statistik	Wang et al. (2025)
PMA	Penanaman Modal Asing	USD	Badan Pusat Statistik	Pham et al. (2025)

2.2 METODE ANALISIS

Penelitian ini menggunakan pendekatan STIRPAT (Stochastic, Impacts, Regression on Population, Affluence, Technology) yang dikembangkan oleh Dietz & Rosa (1994) sebagai perluasan dari model identitas IPAT. Model IPAT menyatakan bahwa dampak lingkungan (I) merupakan hasil interaksi antara jumlah penduduk (P), tingkat kemakmuran (A), dan teknologi (T). Namun, karena bersifat deterministik, model IPAT tidak memungkinkan analisis empiris secara statistik. Studi Tang et al. (2024) menggunakan pendekatan STIRPAT untuk mengidentifikasi faktor-faktor pendorong emisi karbon secara empiris melalui penguraian komponen populasi, aktivitas ekonomi, dan teknologi. Berdasarkan landasan teori dan model

STIRPAT yang digunakan dalam penelitian ini, hubungan antarvariabel penelitian dapat digambarkan melalui kerangka pikir berikut.



Gambar 2. Kerangka Pikir Penelitian

Gambar 2 menunjukkan bahwa tingkat emisi dipengaruhi oleh dua kelompok faktor utama, yaitu mobilitas masyarakat yang direpresentasikan melalui Google Mobility Index dan faktor sosial ekonomi yang mencakup kepadatan penduduk, pertumbuhan ekonomi, tingkat kemiskinan, serta penanaman modal asing. Setiap komponen dalam kerangka pikir tersebut berperan sebagai variabel independen yang diasumsikan memiliki hubungan kausal terhadap perubahan tingkat emisi, sejalan dengan formulasi STIRPAT yang memecah dampak lingkungan berdasarkan dinamika populasi, aktivitas ekonomi, dan teknologi.

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah regresi data panel. Regresi data panel adalah metode analisis statistik yang mengombinasikan karakteristik data time series (runtun waktu) dan cross-section (lintas individu). Dalam melakukan estimasi parameter pada analisis regresi data panel, terdapat tiga pendekatan model yang umum digunakan, yaitu *Common Effect Model* (CEM), *Fixed Effect Model* (FEM), dan *Random Effect Model* (REM) (Baltagi, 2021).

1) *Common Effect Model* (CEM)

$$Y_{it} = \alpha + X_{it}\beta + v_{it} \quad (1)$$

2) *Fixed Effect Model* (FEM)

$$Y_{it} = (\alpha + \mu_i) + X_{it}\beta + v_{it} \quad (2)$$

3) *Random Effect Model* (REM)

$$Y_{it} = \alpha + X_{it}\beta + (\mu_i + v_{it}) \quad (3)$$

Keterangan:

Y_{it} : Variabel tidak bebas pada individu ke-i periode ke-t

α : Intersep

β : Vektor *slope* variabel bebas

X_{it} : Vektor observasi variabel bebas

μ_i : Efek individu

v_{it} : *Error* regresi

Berikut adalah tahapan dalam analisis regresi data panel.

1. Menentukan model regresi panel yang paling sesuai

Dalam tahap ini dilakukan tiga pengujian untuk memilih model terbaik antara *Common Effect Model* (CEM), *Fixed Effect Model* (FEM), dan *Random Effect Model* (REM).

- a) Uji Chow digunakan untuk membandingkan CEM dan FEM. Jika hasil uji menunjukkan bahwa setidaknya ada satu efek individu yang signifikan, maka FEM dipilih. Hipotesis pengujian ini sebagai berikut:

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n = 0$ (tidak terdapat efek individu sehingga CEM lebih sesuai)

H_1 : setidaknya satu $\mu_i \neq 0$; untuk $i = 1, 2, 3, 4, 5$ (terdapat efek individu sehingga FEM lebih sesuai)

Apabila nilai p-value pada signifikansi 5 persen lebih kecil daripada pada (0,05) maka ditolak , sehingga model yang lebih sesuai adalah *fixed effect* dan sebaliknya.

- b) Uji Hausman digunakan untuk memilih antara FEM dan REM. Jika hasil uji menunjukkan ada korelasi antara efek individu dan variabel independen, maka model FEM yang digunakan. Hipotesis pengujiannya sebagai berikut:

$H_0: E(u_{it}|X_{it}) = 0$ (tidak ada korelasi antara error model dan variabel independen, REM lebih sesuai)

$H_1: E(u_{it}|X_{it}) \neq 0$ (terdapat korelasi antara error model dan variabel independen, FEM lebih sesuai)

Apabila nilai p-value pada signifikansi 5 persen lebih kecil daripada pada (0,05) maka ditolak sehingga model yang lebih sesuai adalah *fixed effect* dan sebaliknya.

- c) Uji Breusch-Pagan (BP-LM) dilakukan jika CEM lebih tepat dari uji sebelumnya, untuk melihat apakah REM lebih baik dari CEM. Jika terdapat efek acak, maka REM lebih sesuai. Hipotesis pengujian yang digunakan sebagai berikut:

$H_0: \sigma_\mu^2 = 0$ (varians dari efek individu tidak bersifat random, CEM lebih sesuai)

$H_1: \sigma_\mu^2 \neq 0$ (varians dari efek individu bersifat random, REM lebih sesuai)

Apabila nilai p-value pada signifikansi 5 persen lebih kecil daripada pada (0,05) maka ditolak sehingga penggunaan model REM lebih sesuai dan sebaliknya.

2. Uji struktur varians-kovarians residual

Jika model terbaik adalah FEM, maka dilakukan pengujian untuk melihat apakah terdapat heteroskedastisitas dan korelasi antar unit wilayah (*cross-sectional correlation*).

- Jika terdapat keduanya, maka metode estimasi yang digunakan adalah *Feasible Generalized Least Square* (FGLS) dengan penimbang *Seemingly Unrelated Regression* (SUR).
- Jika hanya terdapat heteroskedastisitas, digunakan metode *Weighted Least Square* (WLS).
- Jika tidak ada keduanya, maka cukup menggunakan metode *Ordinary Least Square* (OLS).

3. Pengujian asumsi klasik

Jika menggunakan metode OLS, asumsi yang harus dipenuhi adalah normalitas, homoskedastis, nonautokorelasi, dan syarat nonmultikolinieritas. Apabila menggunakan metode GLS atau FGLS, asumsi yang harus dipenuhi hanya normalitas dan syarat nonmultikolinieritas.

- Normalitas diuji dengan Jarque-Bera test
- Multikolinearitas diuji dengan nilai *Variance Inflation Factor* (VIF), dan dinyatakan tidak ada jika semua nilai $VIF < 10$.

4. Pengujian signifikan model

Terakhir, dilakukan uji signifikansi untuk mengetahui seberapa besar pengaruh variabel-variabel independen terhadap produktivitas tenaga kerja, baik secara bersama-sama (uji F) maupun secara individu (uji t). Nilai *Adjusted R-squared* digunakan untuk melihat seberapa baik model menjelaskan variabel dependen.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Langkah awal dalam analisis ini dilakukan dengan memeriksa potensi multikolinearitas antarvariabel bebas melalui nilai VIF. Multikolinearitas merupakan kondisi ketika dua atau lebih variabel independen memiliki hubungan yang sangat erat, yang umumnya ditandai oleh nilai $VIF > 10$. Berdasarkan nilai VIF, ditemukan bahwa variabel mobilitas ke tempat kerja dan mobilitas ke tempat rekreasi memiliki nilai $VIF > 10$. Untuk mengatasi potensi multikolinearitas ini, dilakukan seleksi variabel dengan mempertimbangkan kekuatan korelasinya terhadap variabel dependen. Dalam hal ini, mobilitas ke tempat rekreasi dan ke taman umum menunjukkan korelasi paling lemah terhadap emisi karbon, masing-masing sebesar -0,39 dan -0,34 sehingga keduanya dikeluarkan dari model. Adapun, nilai VIF untuk

semua variabel independen yang digunakan dengan mengeluarkan dua variabel tersebut dapat dilihat pada Tabel 2 sebagai berikut.

Tabel 2. Nilai VIF Antar Variabel Bebas

Variabel	VIF
Toko	5.23
Permukiman	2.76
Stasiun	2.89
Tempat Kerja	6.83
PE	2.20
P0	1.17
Kepadatan	1.34
PMA	1.40

Sumber: Data Diolah

Setelah langkah ini dilakukan, nilai VIF untuk semua variabel independen bernilai kecil dari 10. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa multikolinearitas tidak lagi menjadi masalah dalam data yang digunakan.

3.1 PEMILIHAN MODEL TERBAIK

Pemilihan model terbaik dimulai dengan uji Chow berdasarkan hipotesis yang telah dirumuskan sebelumnya. Jika hasilnya signifikan, dilanjutkan dengan uji Hausman. Hasil dari pengujian tersebut disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 3. Ringkasan Hasil Uji Chow dan Hausman

Pengujian	Statistik Uji	p-value	Keputusan
Uji Chow	60.5556	0.0000	Tolak H0
Uji Hausman	5.9042	0.6580	Gagal Tolak H0

Sumber: Data Diolah

Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai p-value pada uji Chow sebesar 0,0000 berada di bawah ambang signifikansi 0,05 sehingga keputusan yang diambil adalah menolak H0. Dengan demikian, pada tingkat signifikansi lima persen, dapat disimpulkan bahwa model FEM menghasilkan estimasi yang lebih baik dibandingkan dengan CEM. Selanjutnya, perbandingan antara FEM dan REM dilakukan menggunakan uji Hausman, sebagaimana dijelaskan pada bagian sebelumnya. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai p-value sebesar 0,6580 yang lebih besar dari 0,05 sehingga gagal tolak H0. Hal ini menunjukkan bahwa REM lebih tepat digunakan dibandingkan dengan FEM dalam konteks penelitian ini. Oleh karena itu, model yang digunakan dalam analisis selanjutnya adalah REM.

3.2 PENGUJIAN ASUMSI KLASIK

Sebelum menerapkan metode estimasi pada model yang telah dipilih, perlu dilakukan pengujian terhadap asumsi klasik, yaitu normalitas residual. Asumsi normalitas

mengharuskan distribusi residual bersifat normal dengan rata-rata nol dan varians konstan (σ^2). Salah satu uji formal yang umum digunakan untuk menguji normalitas distribusi residual adalah uji Jarque-Bera. Hasil pengujian tersebut disajikan sebagai berikut.

Tabel 4. Uji Asumsi Klasik

Pengujian	Metode	p-value	Keputusan	Kesimpulan
Uji Normalitas	Jarque-Bera	0.2386	Gagal Tolak H0	Residual berdistribusi normal

Sumber: Data Diolah

Tabel 4 menunjukkan p-value sebesar 0,2386 lebih besar dari tingkat signifikansi 0,05 sehingga menghasilkan keputusan Gagal Tolak H0. Artinya, pada tingkat signifikansi lima persen, dapat disimpulkan bahwa residual mengikuti distribusi normal.

3.3 ESTIMASI MODEL *RANDOM EFFECT*

Setelah melakukan serangkaian pemilihan model dan pengujian asumsi, maka model terbaik sudah layak untuk melakukan estimasi. Dengan model *random effect* menghasilkan output sebagai berikut.

Tabel 5. Hasil Estimasi REM

Variabel	Koefisien	t-Stat	p-value
C	27832.69	33.7132	0.0000*
Toko	-16.8734	-2.9938	0.0035*
Permukiman	55.9501	2.6981	0.0083*
Stasiun	-8.8640	-1.8734	0.0642
Tempat Kerja	-26.1297	-2.6066	0.0107*
PE	-54.4167	-2.5624	0.0120*
P0	-148.0042	-2.5033	0.0141*
Kepadatan	0.2936	2.3258	0.0222*
PMA	0.14967	1.9439	0.0550
R-Squared	0.8463	F-Statistics	63.3256
Adjusted R-Squared	0.8329	Prob(F-Statistics)	0.0000*

*signifikan pada $\alpha = 5\%$

Sumber: Data Diolah

Setelah model selesai diestimasi dan diperoleh hasil seperti Tabel 5, maka yang dilakukan selanjutnya adalah melakukan uji signifikansi koefisien regresi, baik secara simultan maupun parsial. Uji secara simultan dilakukan dengan uji F. Pada hasil uji F, diperoleh p-value sebesar 0,0000 sehingga menghasilkan keputusan tolak H0. Dengan demikian, pada tingkat signifikansi lima persen, mobilitas ke toko kebutuhan pokok, mobilitas di permukiman, mobilitas ke stasiun, mobilitas ke tempat kerja, pertumbuhan ekonomi, persentase kemiskinan, dan penanaman modal asing secara bersama-sama memengaruhi besarnya emisi karbon (CO) di Indonesia.

Selain pengujian secara simultan, pengujian secara parsial juga perlu untuk dilakukan. Pengujian parsial dilakukan untuk mengetahui pengaruh tiap-tiap variabel independen terhadap emisi karbon (CO) di Indonesia. Berdasarkan nilai statistik uji yang diperoleh pada Tabel 4, diperoleh p-value untuk variabel mobilitas ke toko kebutuhan pokok, mobilitas di permukiman, mobilitas ke tempat kerja, pertumbuhan ekonomi, dan persentase kemiskinan lebih kecil dari 0,05 sehingga menghasilkan keputusan tolak H_0 , sedangkan variabel mobilitas ke stasiun dan penanaman modal asing (PMA) memiliki p-value lebih besar dari 0,05 sehingga gagal tolak H_0 . Oleh karena itu, pada tingkat signifikansi lima persen, dapat disimpulkan bahwa mobilitas ke toko kebutuhan pokok, mobilitas di permukiman, mobilitas ke tempat kerja, pertumbuhan ekonomi, dan persentase kemiskinan masing-masing secara signifikan memengaruhi emisi karbon (CO) di Indonesia, sedangkan mobilitas ke stasiun dan PMA tidak signifikan memengaruhi emisi karbon (CO) di Indonesia. Selain itu, diketahui juga nilai *adjusted R-Squared* sebesar 0,8329. Hal tersebut berarti 83,29 persen variasi yang terjadi pada emisi karbon CO di Indonesia dapat dijelaskan oleh variabel independen dalam model. Model akhir yang diajukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

$$CO_{it} = 27832,69 * -16,8734 Toko_{it}^* + 55,9501 Permukiman_{it}^* - 8,8640 Stasiun_{it} - 26,129 TempatKerja_{it}^* - 54,4167 PE_{it}^* - 148,0042 P0_{it}^* + 0,2936 Kepadatan_{it}^* + 0,14967 PMA_{it}$$

(6)

Berdasarkan hasil estimasi di atas, diketahui bahwa mobilitas ke toko kebutuhan pokok dan tempat kerja masing-masing berpengaruh negatif signifikan terhadap emisi karbon, dengan nilai koefisien sebesar $-16,87$ dan $-26,13$. Artinya, setiap peningkatan 1% mobilitas ke lokasi tersebut akan menurunkan emisi karbon sebesar 16,87 satuan dan 26,13 satuan. Sebaliknya, mobilitas di area permukiman menunjukkan pengaruh positif sebesar 55,95 satuan yang mengindikasikan bahwa peningkatan aktivitas di rumah selama pandemi berkontribusi terhadap naiknya emisi akibat konsumsi energi rumah tangga. Di sisi sosial-ekonomi, pertumbuhan ekonomi dan tingkat kemiskinan menunjukkan pengaruh negatif signifikan, masing-masing sebesar $-54,42$ dan $-148,00$ satuan yang mengindikasikan bahwa pergeseran struktur ekonomi dan keterbatasan konsumsi energi masyarakat miskin cenderung menurunkan emisi. Sementara itu, kepadatan penduduk berpengaruh positif sebesar 0,29 satuan per tambahan 1 jiwa/km². Temuan ini menunjukkan bahwa perilaku mobilitas, serta karakteristik sosial-ekonomi memiliki kontribusi yang kompleks dan saling berkaitan dalam memengaruhi emisi karbon di Indonesia tahun 2020-2022.

3.4 PENGARUH MOBILITAS PENDUDUK TERHADAP EMISI KARBON

Hasil penelitian menunjukkan bahwa mobilitas ke toko kebutuhan pokok dan tempat kerja berpengaruh negatif signifikan terhadap emisi karbon. Meskipun terkesan bertentangan dengan logika umum bahwa mobilitas meningkatkan emisi, pola aktivitas selama pandemi menjelaskan temuan ini. Mobilitas ke toko sering dilakukan dalam jarak dekat dan menggunakan moda tanpa emisi, seperti berjalan kaki atau sepeda, sebuah tren yang tercatat meningkat tajam selama pandemi. Selain itu, banyak sektor menerapkan kerja jarak jauh dan sistem shift, yang menurunkan volume kendaraan dan kepadatan lalu lintas secara drastis. Penurunan intensitas lalu lintas ini membuat kendaraan bergerak lebih lancar, mengurangi waktu terjebak macet, serta menurunkan konsumsi bahan bakar dan emisi per kilometer. Studi oleh Arisanti et al. (2024) mendukung temuan ini, di mana mobilitas ke tempat kerja terbukti menurunkan emisi sektor transportasi selama pandemi di Indonesia.

Sebaliknya, mobilitas di area permukiman menunjukkan pengaruh positif yang signifikan terhadap emisi karbon. Temuan ini mengindikasikan bahwa meningkatnya aktivitas rumah tangga selama masa pembatasan sosial, seperti bekerja dari rumah, penggunaan perangkat elektronik, serta kebutuhan energi untuk pendingin atau pemanas ruangan, turut mendorong konsumsi energi rumah tangga yang berkontribusi terhadap emisi. Kondisi ini sejalan dengan temuan Le Quéré et al. (2020) yang mencatat adanya peningkatan emisi dari sektor residensial sebesar 2,8% selama masa karantina global. Peningkatan ini terjadi akibat pergeseran aktivitas masyarakat ke dalam rumah selama pandemi.

Menariknya, mobilitas ke stasiun tidak berpengaruh signifikan terhadap emisi karbon. Hal ini mencerminkan bahwa peran transportasi publik di Indonesia dalam menekan emisi karbon masih terbatas, baik dari sisi integrasi antar moda maupun elektrifikasinya. Hal ini sejalan dengan temuan Arisanti et al. (2024), yang menunjukkan bahwa meskipun akses terhadap moda transportasi publik meningkat selama pandemi, kontribusinya terhadap penurunan emisi karbon tetap tidak signifikan. Hal ini disebabkan oleh dominasi kendaraan pribadi dalam pergerakan harian masyarakat serta efisiensi dan jangkauan moda publik yang masih terbatas, sehingga dampaknya terhadap pengurangan emisi secara agregat belum optimal.

3.5 PENGARUH INDIKATOR SOSIAL EKONOMI TERHADAP EMISI KARBON

Dari sisi ekonomi, hasil penelitian menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi justru berkaitan dengan penurunan emisi karbon. Hal ini disebabkan adanya efisiensi energi, misalnya, penggunaan teknologi yang lebih hemat energi atau pergeseran aktivitas ekonomi ke sektor-sektor yang lebih ramah lingkungan, seperti jasa dan digital. Kondisi ini bisa terjadi terutama pada masa pemulihan setelah pandemi, saat banyak industri mulai berbenah dan menyesuaikan

diri dengan tuntutan efisiensi dan keberlanjutan. Temuan bahwa pertumbuhan ekonomi berkaitan dengan penurunan emisi karbon mencerminkan terjadinya proses decoupling antara aktivitas ekonomi dan tekanan lingkungan. Hal ini menunjukkan bahwa ketika struktur ekonomi bergeser ke sektor yang lebih efisien dan rendah karbon, seperti sektor jasa, digital, dan industri hijau, pertumbuhan ekonomi tidak lagi menjadi pendorong utama peningkatan emisi. Kondisi ini juga terlihat pada periode pasca pandemi, saat banyak pelaku industri melakukan adaptasi terhadap tuntutan efisiensi energi dan keberlanjutan. Sejalan dengan hal ini, González-Álvarez & Montañés (2023) menunjukkan bahwa hubungan antara PDB dan emisi karbon berubah secara signifikan setelah krisis global. Elastisitas emisi terhadap PDB menjadi negatif, yang menandakan bahwa pertumbuhan ekonomi dapat terjadi bersamaan dengan penurunan emisi, khususnya ketika didukung oleh transisi energi dan kebijakan lingkungan yang progresif.

Tingkat kemiskinan juga menunjukkan pengaruh negatif signifikan terhadap emisi karbon, terutama dalam jangka pendek. Hal ini karena masyarakat miskin seringkali tidak memiliki akses terhadap energi fosil, yang intensif karbon sehingga konsumsi energi mereka sangat terbatas. Efek ini ditegaskan oleh Yu & Liu (2022) yang dalam studinya menemukan bahwa kemiskinan menurunkan emisi CO₂ dalam jangka pendek, meskipun efek ini dapat berubah seiring kondisi ekonomi pulih dan akses energi membaik.

Sementara itu, kepadatan penduduk menunjukkan pengaruh positif signifikan terhadap emisi karbon. Temuan ini mencerminkan bahwa wilayah dengan populasi yang tinggi cenderung menghasilkan emisi karbon yang lebih besar karena peningkatan konsumsi energi rumah tangga, penggunaan kendaraan bermotor, dan intensitas aktivitas sosial-ekonomi. Temuan penelitian ini diperkuat oleh studi Muzayanah et al. (2022), yang menunjukkan bahwa kepadatan penduduk memiliki hubungan positif terhadap peningkatan konsumsi energi di berbagai wilayah di Indonesia. Dalam konteks ini, tingginya jumlah penduduk dalam suatu wilayah mencerminkan peningkatan kebutuhan energi untuk aktivitas sehari-hari, mulai dari penggunaan listrik rumah tangga hingga konsumsi bahan bakar untuk mobilitas. Ketika konsumsi energi meningkat, terutama yang masih berbasis pada sumber energi fosil, maka emisi karbon pun cenderung ikut naik. Dengan demikian, wilayah dengan kepadatan penduduk tinggi menjadi kontributor utama terhadap beban emisi, bukan hanya karena jumlah orang yang besar, tetapi juga karena akumulasi konsumsi energi yang menyertainya.

Adapun, variabel Penanaman Modal Asing (PMA) dalam penelitian ini tidak signifikan secara statistik terhadap emisi karbon. Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan investasi asing

tidak secara otomatis berkorelasi langsung dengan peningkatan maupun penurunan emisi karbon di suatu wilayah. Temuan ini dapat dijelaskan melalui karakteristik PMA yang sangat kontekstual dan sektoral, di mana dampaknya terhadap lingkungan sangat ditentukan oleh sektor tujuan investasi, jenis teknologi yang dibawa, serta struktur energi yang mendukung aktivitas ekonomi tersebut. Hasil ini sejalan dengan temuan Shabir et al. (2022) yang menunjukkan bahwa hubungan antara FDI dan emisi karbon tidak selalu konsisten di seluruh wilayah yang diteliti. Studi tersebut menyimpulkan bahwa pengaruh FDI terhadap emisi dapat menjadi tidak signifikan bila investasi mengalir ke sektor yang tidak terlalu intensif energi atau ketika negara penerima memiliki kebijakan lingkungan yang ketat serta bauran energi yang lebih bersih. Dengan demikian, ketidaksignifikanan PMA dalam penelitian ini memperkuat argumen bahwa keberhasilan investasi asing dalam menurunkan atau menghindari peningkatan emisi karbon sangat tergantung pada sinergi antara arah investasi, efisiensi teknologi, dan kebijakan transisi energi yang diterapkan di tingkat lokal. Tanpa dukungan struktural tersebut, PMA berpotensi netral atau bahkan kontraproduktif terhadap tujuan keberlanjutan lingkungan. Secara keseluruhan, temuan penelitian ini menunjukkan bahwa dinamika emisi karbon di Indonesia dipengaruhi oleh kombinasi kompleks antara mobilitas penduduk dan faktor sosial-ekonomi. Mobilitas ke tempat kerja dan toko yang berkurang emisinya selama pandemi menyoroti pentingnya perubahan perilaku dan sistem kerja fleksibel dalam mengurangi tekanan lingkungan. Di sisi lain, peningkatan aktivitas di area permukiman justru meningkatkan emisi, mengindikasikan perlunya perhatian terhadap konsumsi energi domestik. Faktor sosial-ekonomi seperti pertumbuhan ekonomi dan kemiskinan menunjukkan bahwa arah perubahan emisi sangat ditentukan oleh struktur energi dan inklusi akses. Sementara kepadatan penduduk terbukti menjadi pendorong utama peningkatan emisi, sedangkan Penanaman Modal Asing belum menunjukkan dampak yang konsisten tanpa intervensi teknologi bersih. Temuan-temuan ini memberikan pijakan penting bagi perumusan kebijakan lingkungan yang lebih kontekstual, adaptif, dan berorientasi pada integrasi lintas sektor.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa mobilitas penduduk dan faktor sosial ekonomi secara simultan berpengaruh signifikan terhadap emisi karbon di Indonesia pada periode 2020 hingga 2022. Secara parsial, mobilitas ke toko kebutuhan pokok dan tempat kerja, pertumbuhan ekonomi, dan tingkat kemiskinan berpengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi, sedangkan aktivitas di permukiman dan kepadatan penduduk berpengaruh positif dan

signifikan terhadap emisi karbon. Sementara itu, mobilitas ke stasiun dan penanaman modal asing tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan.

Temuan ini menegaskan pentingnya perumusan kebijakan transportasi yang lebih terintegrasi dan rendah emisi, khususnya di wilayah padat penduduk. Pemerintah perlu mendorong sistem kerja fleksibel dan mobilitas aktif, seperti berjalan kaki dan bersepeda. Selain itu, peningkatan efisiensi energi rumah tangga dan perluasan akses energi bersih bagi kelompok rentan menjadi prioritas. Untuk investasi asing, diperlukan penguatan regulasi lingkungan agar aliran modal selaras dengan tujuan transisi energi. Kajian lebih lanjut di wilayah perkotaan pasca-pandemi juga penting untuk menilai efektivitas intervensi jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Rayash, A. and Dincer, I., 2020. Analysis of mobility trends during the COVID-19 coronavirus pandemic: exploring the impacts on global aviation and travel in selected cities. *Energy Research and Social Science*, 68, 101693. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101693>
- Arisanti, R., Purnamawati, S. and Muslim, A., 2024. Determinants of greenhouse gas emissions in the transportation sector in Indonesia: official statistics and big data approach. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 14(1), pp.86–97. <https://doi.org/10.32479/ijeep.15035>
- Badan Pusat Statistik, 2021. *Statistik Indonesia 2020*. Catalog 1101001. Jakarta: BPS. Available at: <https://www.bps.go.id/publication/2020/04/29/e9011b3155d45d70823c141f/statistik-indonesia-2020.html>
- Baltagi, B.H., 2021. *Econometric analysis of panel data*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-53953-5>
- Dietz, T. and Rosa, E.A., 1994. Rethinking the environmental impacts of population. *Human Ecology Review*, 1(2), pp.277–300.
- González-Álvarez, M.A. and Montañés, A., 2023. CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth: determining the stability of the 3E relationship. *Economic Modelling*, 121, 106195. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2023.106195>
- Institute for Essential Services Reform, 2023. *Indonesia energy transition outlook*. Jakarta: IESR.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022. Summary for policymakers. In: *Managing*

- the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. Cambridge: Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.003>
- Khan, S.U.D., 2021. Environmental sustainability: a clean energy aspect versus poverty. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(11), pp.13097–13104.
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-11520-6>
- Kurniawan, R., Hasabi, R., Wongsonadi, S.K., Gio, P.U., Purwanto, A. and Sumargo, B., 2025. Examining the influence of congestion, industry, and green open space on air quality vulnerability towards green development in Jakarta. *Innovation and Green Development*, 4, 100247. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2025.100247>
- Le Quéré, C. *et al.*, 2020. Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Climate Change*, 10(7), pp.647–653.
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>
- Mobility, T.C., 2022. *COVID-19 community mobility report: Indonesia, 15 October 2022*. Available at: https://www.gstatic.com/covid19/mobility/2022-10-15_ID_Mobility_Report_en.pdf
- Muzayanah, I.F.U., Lean, H.H., Hartono, D., Indraswari, K.D. and Partama, R., 2022. Population density and energy consumption: a study in Indonesian provinces. *Heliyon*, 8(9), e10634. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10634>
- Pham, P.M.H., Nguyen, T.D., Nguyen, M. and Tran, N.T., 2025. FDI inflows and carbon emissions: new global evidence. *Discover Sustainability*, 6(1), 432. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01292-9>
- Shabir, M., Gill, A.R. and Ali, M., 2022. The impact of transport energy consumption and foreign direct investment on CO₂ emissions in ASEAN countries. *Frontiers in Energy Research*, 10, 994062. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.994062>
- Statista, 2024. *Transportation emissions worldwide: statistics and facts*. Available at: <https://www.statista.com/topics/7476/transportation-emissions-worldwide/>
- Stern, P.C., 2000. New environmental theories: toward a coherent theory of environmentally significant behavior. *Journal of Social Issues*, 56(3), pp.407–424.
<https://doi.org/10.1111/0022-4537.00175>
- Tang, J., Zheng, J., Yang, G., Li, C. and Zhao, X., 2024. Carbon emission prediction in a region of Hainan Province based on improved STIRPAT model. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(49), pp.58795–58817. <https://doi.org/10.1007/s11356-024->

35027-6

- United Nations Conference on Trade and Development, 2022. *World investment report 2022: digitalization and investment*. Geneva: UNCTAD.
- Wang, C., Chen, J., Wang, Q., Li, D., Zhu, M., Gan, Z. and Zhang, Y., 2025. Investigation of the influence and mechanism of urban population agglomeration on carbon emission efficiency. *Journal of Urban Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2025.05.006>
- World Population Review, 2023. *CO₂ emissions by country 2025*. Available at: <https://worldpopulationreview.com>
- World Resources Institute, 2024. *Indonesia's path to net-zero emission: measuring road transport emissions as the foundation for a sustainable transport policy*. Available at: <https://wri-indonesia.org>
- Wu, Y. and Wan, J., 2024. The race between global economic growth and carbon emissions: a comparative study of developed and developing countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(13), pp.19226–19243. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32275-4>
- Yu, Y. and Liu, Q., 2022. An empirical study on correlation among poverty, inclusive finance, and CO₂ emissions in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(47), pp.71400–71411. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19901-9>