

Dampak PDRB Industri dan Transportasi terhadap Emisi CO₂ Lima Provinsi Sumatera Periode 2015-2023

Nazila Hafitsah *¹
Indah Fadhilah ²
Sabrina Tiara Sovia ³
Neli Aida ⁴
Muhammad Mufti Hudani ⁵
Qurrota Ayu Nindien ⁶

^{1,2,3,4,5,6} Program Studi Ilmu Ekonomi Studi Pembangunan, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Lampung, Indonesia

*e-mail : nazilahafitsah@gmail.com¹, indahfadila57@gmail.com², sabrinatiara74@gmail.com³

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) sektor industri dan sektor transportasi terhadap emisi karbon dioksida (CO₂) di lima provinsi di Pulau Sumatera selama periode 2015 hingga 2023. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode regresi data panel, serta pemilihan model terbaik berdasarkan Uji Chow, Hausman, dan Lagrange Multiplier, yang menghasilkan model Common Effect sebagai model yang paling tepat. Hasil estimasi menunjukkan bahwa PDRB sektor industri berpengaruh positif dan signifikan pada tingkat signifikansi 10%, sementara PDRB sektor transportasi berpengaruh negatif dan signifikan pada tingkat signifikansi 5% terhadap emisi CO₂. Secara Bersama-sama, kedua variabel independen tersebut memiliki pengaruh signifikan terhadap emisi karbon. Temuan ini menegaskan perlunya perhatian kebijakan yang seimbang antara pertumbuhan ekonomi dan pelestarian lingkungan.

Kata kunci: Data Panel; Emisi CO₂; PDRB Industri; PDRB Transportasi; Sumatera

Abstract

This study aims to analyze the effect of the Gross Regional Domestic Product (GRDP) of the industrial and transportation sectors on carbon dioxide (CO₂) emissions in five provinces of Sumatra from 2015 to 2023. Using a quantitative approach and panel data regression method, the selection of the best model was based on Chow, Hausman, and Lagrange Multiplier tests, resulting in the Common Effect Model as the most appropriate. The estimation results show that the industrial GRDP has a positive and statistically significant effect at the 10% level, while the transportation GRDP has a negative and significant effect at the 5% level on CO₂ emissions. Both independent variables jointly have a significant influence on carbon emissions. These findings emphasize the importance of balanced policies between economic growth and environmental sustainability.

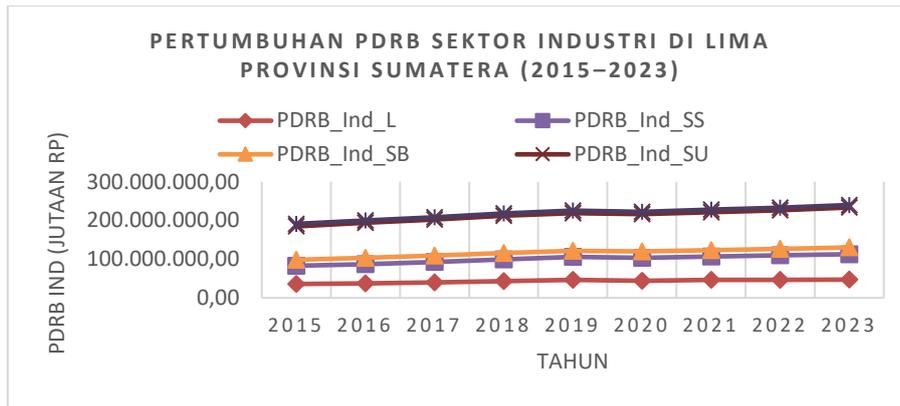
Keywords: CO₂ Emissions; Industrial GRDP; Panel Data; Sumatera; Transportation GRDP

PENDAHULUAN

Perekonomian merupakan salah satu elemen penting dalam kehidupan masyarakat yang terus mengalami perkembangan seiring dengan kemajuan perkembangan seiring dengan kemajuan peradaban. Tingginya laju pertumbuhan ekonomi sering terjadinya tolak ukur keberhasilan pembangunan suatu wilayah. Namun demikian, kemajuan ekonomi tersebut juga membawa tantangan besar, khususnya terkait dengan dampak lingkungan. Salah satu persoalan utama yang muncul adalah peningkatan emisi gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO₂). Kadar emisi CO₂ yang tinggi menjadi penyumbang signifikan terhadap perubahan iklim dan memburuknya kualitas lingkungan. Oleh karena itu, kualitas lingkungan menjadi aspek penting bagi keberlangsungan hidup manusia (Esther et al., 2023).

Di Indonesia, laju pertumbuhan ekonomi yang tinggi, khususnya pada sektor industri dan transportasi, telah menjadi kontributor utama dalam mendorong peningkatan Produk Domestik Regional Bruto (PDRB). Sektor industri yang mencakup aktivitas produksi, serta sektor transportasi yang memfasilitasi pergerakan barang dan manusia, memberikan peran besar terhadap pertumbuhan ekonomi regional. Meskipun demikian, kemajuan di kedua sektor tersebut tanpa disertai pengelolaan lingkungan yang memadai dapat memicu peningkatan emisi karbon dioksida yang (CO₂) berdampak negatif terhadap keberlanjutan pembangunan.

Untuk melihat bagaimana kontribusi sektor industri terhadap pertumbuhan ekonomi di wilayah Sumatera, berikut disajikan grafik:



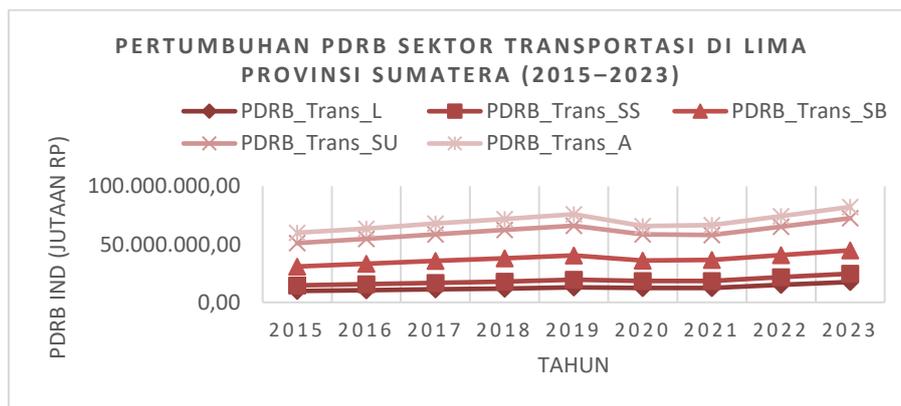
Gambar 1 Pertumbuhan PDRB Sektor Industri di Lima Provinsi Sumatera (2015-2023)

Sumber: Badan Pusat Statistik setiap provinsi dan data diolah

Ket* L-Lampung, SS-Sumatera Selatan, SB- Sumatera Barat, SU- Sumatera Utara, A- Aceh

Berdasarkan gambar 1 yang menunjukkan bahwa pertumbuhan PDRB sektor industri yang meningkat dari tahun ke tahun di kelima provinsi. Sumatera Utara dan Sumatera Selatan mencatat angka tertinggi, menunjukkan peran dominan dan peranan penting sektor industri dalam mendorong pembangunan ekonomi daerah (Agustina dan Hadi, 2021). Namun, pertumbuhan ini juga berimplikasi terhadap peningkatan kebutuhan energi dan potensi emisi karbon.

Selain sektor industri, sektor transportasi juga merupakan pendorong utama aktivitas ekonomi, terutama dalam hal distribusi barang dan mobilitas penduduk antardaerah. Perkembangan ini ditunjukkan dalam grafik berikut:



Gambar 2

Pertumbuhan PDRB Sektor Transportasi di Lima Provinsi Sumatera (2015-2023)

Sumber: Badan Pusat Statistik setiap provinsi dan data diolah

Ket* L-Lampung, SS-Sumatera Selatan, SB- Sumatera Barat, SU- Sumatera Utara, A- Aceh

Gambar 2 menunjukkan bahwa sektor transportasi mengalami tren peningkatan yang stabil di seluruh provinsi. Lampung dan Sumatera Selatan mencatat lonjakan signifikan akibat meningkatnya infrastruktur jalan, pelabuhan, dan logistik. Namun demikian, dominasi moda transportasi berbahan bakar fosil menjadikan sektor ini penyumbang besar emisi CO₂.

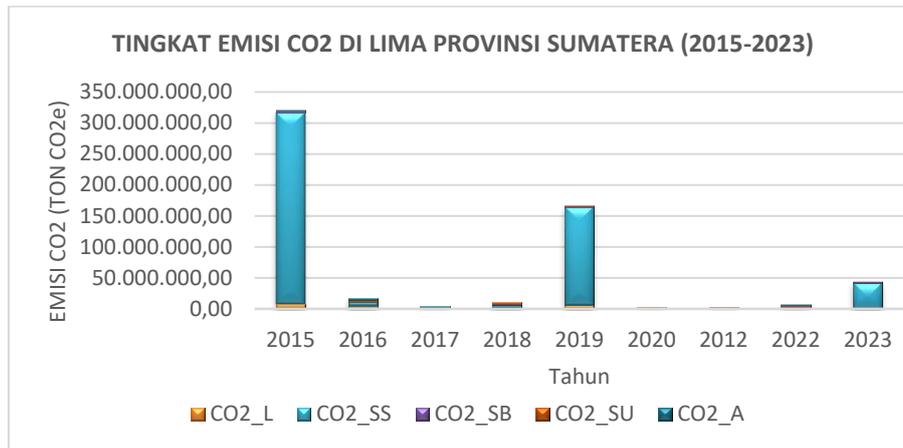
Penelitian yang dilakukan oleh Gupito dan Kodoatie (2022) mengungkapkan adanya korelasi positif dan signifikan antara PDRB sektor transportasi dan kehutanan dengan tingkat emisi di wilayah Jawa Tengah. Begitu pula dengan hasil penelitian yang dilakukan Faris (2022) untuk Jawa Timur dimana sektor transportasi dan pertanian berpengaruh positif terhadap emisi karbondioksida (Bakri, Anas, dan Aidid, 2024). Temuan tersebut menegaskan pentingnya kajian di wilayah lain seperti CO₂ Sumatera untuk mengukur sejauh mana pertumbuhan ekonomi juga membawa konsekuensi terhadap lingkungan.

Kawasan Sumatera, yang mencakup Provinsi Aceh, Sumatera Utara, Sumatera Barat, Sumatera Selatan, dan Lampung, memiliki potensi ekonomi yang besar. Namun demikian, seiring meningkatnya aktivitas ekonomi, muncul tantangan besar dalam menyeimbangkan antara pertumbuhan dan pelestarian lingkungan.

Provinsi -provinsi yang tercantum dalam penelitian ini Aceh, Sumatera Utara, Sumatera Barat, Sumatera Selatan, dan Lampung merupakan provinsi-provinsi yang memberikan kontribusi signifikan

terhadap PDRB regional Pulau Sumatera (BPS, 2025). Karena memiliki kawasan industri yang besar, pelabuhan primer, dan tingkat urbanisasi yang relatif tinggi, provinsi-provinsi tersebut memiliki tingkat aktivitas industri dan transportasi yang tinggi. Hal ini juga sesuai dengan penelitian Helda dkk. (2018) yang menyatakan bahwa daerah - daerah dengan tingkat urbanisasi dan aktivitas ekonomi yang tinggi secara bertahap meningkatkan emisi karbon.

Sebagai akibat dari pertumbuhan di sektor industri dan transportasi tersebut, emisi karbon dioksida juga mengalami peningkatan di wilayah ini. Hal tersebut tergambar dalam grafik berikut:



Gambar 3 Tingkat Emisi CO₂ di Lima Provinsi Sumatera (2015-2023)
Sumber: Badan Pusat Statistik setiap provinsi dan data diolah
Ket* L-Lampung, SS-Sumatera Selatan, SB- Sumatera Barat, SU- Sumatera Utara, A- Aceh

Berdasarkan gambar 3 yang memperlihatkan bahwa tren kenaikan emisi CO₂ selama delapan tahun terakhir, di mana Sumatera Selatan mencatat angka tertinggi. Peningkatan emisi karbon pada tahun-tahun tersebut, khususnya 2015, 2019, dan 2023, dapat dipengaruhi secara signifikan oleh aktivitas industri dan transportasi sebagai akibat dari program pembangunan infrastruktur dan pertumbuhan ekonomi. Misalnya, tahun 2015 bertepatan dengan dimulainya pembangunan strategis nasional di Sumatera. Sementara untuk tahun 2019 dan 2023 juga menunjukkan peningkatan yang reupa karena adanya peningkatan output industri pasca-pemilu (Humas, 2019), dan dorongan pasca pandemi (Kemenkeu, 2022). Studi Ramadhan (2023) lebih lanjut mencatat bahwa fluktuasi emisi sering kali berkorelasi dengan momentum ekonomi yang kuat dan perluasan sektor energi.

Hal ini mengindikasikan bahwa aktivitas ekonomi yang tidak dikelola secara berkelanjutan dapat menyebabkan degradasi lingkungan yang serius. Dalam konteks tersebut, penting untuk tahu bahwa emisi CO₂ adalah salah satu gas rumah kaca yang paling berperan dalam memicu pemanasan global, sehingga peningkatan emisi tersebut menjadi isu lingkungan yang krusial (Fitri, Putri dan Retnawaty, 2020).

Oleh sebab itu, diperlukan kajian yang komprehensif untuk menganalisis pengaruh PDRB sektor industri dan transportasi terhadap emisi CO₂ di lima provinsi tersebut selama periode 2015 hingga 2023. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan tingkat emisi CO₂ dengan pendekatan kuantitatif berbasis data panel.

Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini tidak hanya menyoroti aspek ekonomi, tetapi juga mempertimbangkan konsekuensi lingkungan yang timbul dari pertumbuhan sektor industri dan transportasi. Melalui pemahaman yang lebih mendalam mengenai hubungan tersebut, diharapkan dapat dirumuskan solusi yang seimbang antara kemajuan ekonomi dan pelestarian lingkungan. Penelitian ini juga mengacu pada studi Cholily (2023), yang menegaskan pentingnya integrasi aspek lingkungan dalam perencanaan pertumbuhan ekonomi di Indonesia.

PENELITIAN TERDAHULU

Pertumbuhan industri dan percepatan pembangunan infrastruktur transportasi di Sumatera selama dekade terakhir telah menjadi lokomotif utama peningkatan Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) di kawasan tersebut. Namun, lonjakan aktivitas ekonomi ini juga menimbulkan kekhawatiran akan peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂), yaitu gas rumah kaca utama yang berperan besar dalam mempercepat perubahan iklim. Menimbang urgensi isu tersebut, jurnal ini yang berjudul "*Dampak PDRB Industri dan Transportasi terhadap Emisi CO₂ di Lima Provinsi Sumatera Periode 2015–2023*" berupaya

menganalisis bagaimana ekspansi sektor industri dan transportasi jalan berkontribusi terhadap fluktuasi emisi karbon antardaerah, sekaligus menilai peran investasi dan urbanisasi sebagai faktor yang dapat memperkuat atau memperlemah dampaknya.

Pertama, studi oleh Syafina Hela dan Marlina Ekawaty (2024) yang berjudul *"Pengaruh PDRB Sektor Industri, Transportasi, dan Pertanian terhadap Emisi CO₂ di Provinsi Jawa Tengah"* menunjukkan bahwa peningkatan PDRB sektor industri berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂. Artinya, semakin besar aktivitas industri, maka semakin tinggi pula emisi karbon yang dihasilkan, yang sejalan dengan pola pertumbuhan ekonomi yang kurang ramah lingkungan. Temuan ini didukung oleh data bahwa industri di Jawa Tengah berkembang pesat dalam dua dekade terakhir, namun juga berkontribusi pada peningkatan emisi, salah satunya melalui penggunaan bahan bakar fosil dan minimnya ruang terbuka hijau di kawasan industri. Sementara itu, penelitian tersebut juga menemukan bahwa PDRB sektor transportasi justru memiliki pengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi CO₂. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan output sektor transportasi di Jawa Tengah cenderung menurunkan emisi karbon, yang kemungkinan besar dipicu oleh peningkatan efisiensi transportasi publik seperti penggunaan Bus Rapid Transit (BRT) Trans Jateng dan kereta api lokal yang menggantikan kendaraan pribadi.

Kedua, Berdasarkan hasil penelitian dalam jurnal Akbar Maulana Ramadhan (2023) yang berjudul *"Dampak Pertumbuhan Ekonomi Terhadap Kualitas Lingkungan Hidup di Provinsi Pulau Sumatera"*, dijelaskan bahwa hubungan antara variabel ekonomi dan kualitas lingkungan hidup memiliki karakteristik yang kompleks di wilayah Sumatera. Penelitian ini menggunakan data panel dari sepuluh provinsi di Pulau Sumatera untuk periode 2016–2019, dengan pendekatan regresi log-linier berbasis Random Effect Model (REM). Variabel yang diuji mencakup pertumbuhan ekonomi, industri, pertanian, pertambangan, deforestasi, dan penyerapan tenaga kerja, terhadap variabel dependen berupa Indeks Kualitas Lingkungan Hidup (IKLH). Hasil utama menunjukkan bahwa hanya sektor industri yang memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas lingkungan hidup, sedangkan variabel lainnya, termasuk pertumbuhan ekonomi dan sektor pertanian serta transportasi tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan. Koefisien negatif dari sektor industri menunjukkan bahwa peningkatan aktivitas industri cenderung menurunkan kualitas lingkungan di wilayah Sumatera. Hal ini berbanding lurus dengan konsep eksternalitas negatif, di mana aktivitas produksi menimbulkan polusi dan limbah yang tidak ditanggung langsung oleh pelaku ekonomi, namun berdampak buruk terhadap masyarakat dan lingkungan.

Ketiga, Berdasarkan hasil penelitian dalam jurnal karya Hilda Mediana (2021) berjudul *"Analisis Pengaruh PDRB Sektor Pertanian, Sektor Industri Pengolahan, Sektor Transportasi dan Pergudangan terhadap Kualitas Lingkungan Hidup Tahun 2012–2017 (Studi Kasus 33 Provinsi di Indonesia)"*, diketahui bahwa PDRB sektor pertanian dan sektor industri pengolahan berpengaruh positif serta signifikan terhadap kualitas lingkungan hidup. Artinya, peningkatan nilai tambah dari kedua sektor tersebut berkontribusi terhadap perbaikan lingkungan, yang kemungkinan besar dipengaruhi oleh penerapan teknologi yang lebih ramah lingkungan dalam proses produksi industri maupun praktik pertanian berkelanjutan. Di sisi lain, PDRB sektor transportasi dan pergudangan menunjukkan pengaruh negatif dan signifikan terhadap kualitas lingkungan hidup, yang mengindikasikan bahwa pertumbuhan sektor ini justru cenderung menurunkan kualitas lingkungan, terutama disebabkan oleh tingginya konsumsi bahan bakar fosil dan tingginya emisi kendaraan bermotor. Dengan demikian, hasil ini menegaskan bahwa meskipun pertumbuhan ekonomi melalui sektor industri dan pertanian dapat diarahkan untuk mendukung keberlanjutan lingkungan, namun sektor transportasi masih memerlukan perhatian dan penguatan kebijakan agar lebih selaras dengan prinsip pembangunan berkelanjutan.

Keempat, berdasarkan Penelitian yang dilakukan oleh Irfan Bagus Triyanto (2024) yang berjudul *"Pengaruh Sektor Industri, Transportasi, Serta Listrik dan Gas Terhadap Emisi Karbon Dioksida di Indonesia Tahun 2010–2022"* dari Universitas Gadjah Mada menunjukkan bahwa sektor industri memiliki pengaruh positif dan signifikan terhadap emisi karbon dioksida (CO₂) di Indonesia selama periode 2010–2022. Dengan menggunakan metode regresi data panel, hasil penelitian mengungkap bahwa peningkatan aktivitas sektor industri berdampak langsung pada meningkatnya emisi CO₂, yang disebabkan oleh tingginya ketergantungan industri terhadap bahan bakar fosil, terutama di sektor manufaktur seperti baja, semen, dan petrokimia. Selain itu, sektor transportasi juga ditemukan berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂, meskipun kontribusinya lebih kecil dibandingkan sektor industri dan sektor listrik dan gas, yang justru menjadi kontributor emisi terbesar selama periode penelitian. Temuan ini sejalan dengan teori Environmental Kuznets Curve (EKC), yang menyatakan bahwa pada tahap awal pertumbuhan ekonomi, emisi cenderung meningkat sebelum menurun pada fase ekonomi yang lebih maju. Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan perlunya transisi menuju energi terbarukan serta penerapan teknologi industri yang lebih ramah lingkungan guna menekan laju emisi karbon di masa mendatang.

METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan data panel sebagai metode analisis untuk menganalisis bagaimana pengaruh dan dampak Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) dari sektor industri dan sektor transportasi terhadap emisi CO₂ di lima provinsi Sumatera, yaitu Lampung, Sumatera Selatan, Sumatera Barat, Sumatera Utara dan Aceh selama periode waktu tahun 2015 hingga 2023. Data yang digunakan dalam penelitian merupakan data sekunder yang bersifat panel, yaitu kombinasi data cross-section dan data time series. Data penelitian diperoleh dari publikasi resmi Badan Pusat Statistik (BPS) masing-masing dari kelima provinsi, Kementerian Kehutanan RI dan Sistem Pemantauan Karhutla.

Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan terdiri dari satu variabel dependen dan dua variabel independen. Variabel dependen penelitian adalah emisi CO₂ dalam satuan ton CO₂e, yang menggambarkan tingkat polusi karbon dari aktivitas perekonomian. Variabel independennya terdiri atas PDRB sektor industri dan sektor transportasi, masing-masing dalam satuan juta rupiah atas dasar harga konstan. Transformasi logaritma natural dilakukan terhadap semua variabel penelitian yang bertujuan untuk mengurangi heteroskedastisitas dan memperbaiki distribusi data agar mendekati normal.

Definisi operasional untuk masing-masing variabel yang telah disebutkan adalah sebagai berikut.

- 3) Emisi CO₂, merupakan total emisi karbon yang dihasilkan dari aktivitas tiap provinsi per tahun, digunakan sebagai indikator utama dampak lingkungan pembangunan ekonomi (Sofiani et al., 2022).
- 3) PDRB sektor industri, merupakan indikator yang menggambarkan keadaan perekonomian penduduk di suatu wilayah (Novitasari D A., 2015).
- 3) PDRB sektor transportasi, merepresentasikan nilai tambah bruto dari sektor transportasi dan aktivitas distribusi barang dan jasa dalam suatu wilayah (Muttaqin et al., 2024).

Teknik Analisis Data

Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah regresi data panel. Terdapat tiga model estimasi dalam regresi data panel, yaitu Common Effect Model (Pooled Least Squares), Fixed Effect Model (FEM), dan Random Effect Model (REM). Analisis data penelitian dilakukan dengan melakukan pengujian secara statistik terhadap variabel-variabel yang telah dikumpulkan dengan perangkat *Eviews 13*.

Common Effect Model atau biasa juga disebut PLS merupakan model regresi yang paling sederhana untuk analisis data panel. Model ini mengasumsikan bahwa tidak ada perbedaan antar individu atau waktu dalam data, yang berarti semua data dianggap sama. Jadi, karakteristik khusus dari masing-masing negara atau waktu tidak diperhitungkan. Fixed Effect Model (FEM) digunakan ketika peneliti ingin memperhitungkan efek spesifik yang berbeda antar individu atau periode waktu. Model ini mengasumsikan bahwa setiap unit memiliki karakteristik tetap yang tidak berubah sepanjang waktu dan dapat mempengaruhi variabel dependen. Artinya, model ini menjelaskan bahwa perbedaan antar negara atau waktu adalah faktor tetap yang perlu dilihat dan dipertimbangkan. Random Effect Model (REM) mengasumsikan bahwa perbedaan antar negara atau waktu adalah efek acak yang tidak dapat diminati, tetapi tetap mempengaruhi variabel terikat.

Pemilihan model yang tepat untuk analisis data panel yang akan digunakan dalam penelitian. Setiap model CEM, FEM, REM memiliki pendekatan yang berbeda dalam menangani data panel, maka dari itu untuk menentukan model mana yang paling tepat digunakan, yaitu melalui uji Chow (digunakan untuk membandingkan CEM dan FEM), uji Hausman (digunakan untuk memilih antara FEM dan REM), dan uji Lagrange Multiplier atau LM test (untuk memutuskan antara CEM dan REM) sesuai dengan prosedur yang dikembangkan oleh Greene (2012).

1) Uji Chow

Uji Chow ini digunakan untuk membandingkan antara CEM dan FEM. Uji ini untuk mengetahui model mana yang lebih baik antara model pooled yang tidak memperhitungkan perbedaan antar individu dengan model fixed yang memperhitungkan efek individu yang tetap (Kristiana, Laut, dan Prakoso, 2021).

Hipotesis Uji Chow:

H_0 = Common Effect Model (CEM) lebih baik (data tidak memiliki perbedaan signifikan antar unit atau waktu).

H_a = Fixed Effect Model (FEM) lebih baik (data memiliki perbedaan signifikan antar unit atau waktu).

Kriteria Pengujian:

- Jika prob $> \alpha$, maka H_0 diterima artinya CEM lebih baik
- Jika prob $< \alpha$, maka H_0 ditolak artinya FEM lebih baik

2) Uji Hausman

Uji Hausman digunakan memilih model mana lebih baik antara Fixed Effect Model (FEM) dan Random Effect Model (REM) (Utomo, Putro, dan Suryonto, 2020). Uji ini melihat apakah efek individual dalam model random effect dapat dianggap acak atau lebih baik sebagai tetap. Uji ini membantu menentukan model mana yang memberikan estimasi yang tepat dan efisien.

Hipotesis Uji Hausman:

H_0 = Random Effect Model (REM) lebih baik (efek individual dianggap acak).

H_a = Fixed Effect Model (FEM) lebih baik (efek individual dianggap tetap).

Kriteria pengujian:

- Jika prob $> \alpha$, maka H_0 diterima artinya REM lebih baik
- Jika prob $< \alpha$, maka H_0 ditolak artinya FEM lebih baik

3) Uji Lagrange Multiplier (LM)

Uji LM merupakan lanjutan dari uji Hausman, apabila H_0 diterima (REM digunakan) maka lanjut ke uji LM/B-G. Uji LM ini digunakan untuk membandingkan model mana yang lebih baik antara model Random Effect dengan Model Common Effect (Luhung dan Yuniasih, 2023).

Hipotesis Uji LM:

H_0 = Common Effect Model (CEM) lebih baik (tidak ada efek acak).

H_a = Random Effect Model (REM) lebih baik (ada efek acak).

Kriteria pengujian:

- Jika prob $> \alpha$, maka H_0 diterima artinya CEM lebih baik
- Jika prob $< \alpha$, maka H_0 ditolak artinya REM lebih baik

Metode estimasi panel secara umum (logaritma natural) dirumuskan sebagai berikut:

$$\ln Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln X_{1it} + \beta_2 \ln X_{2it} + \varepsilon_{it}$$

Keterangan:

Y	: Emisi Karbon Dioksida (CO ₂)
β_0	: Konstanta
$\beta_1 \beta_2$: Koefisien regresi masing-masing variabel independen
Ln	: Logaritma natural
X_1	: PDRB dari sektor industri
X_2	: PDRB dari sektor transportasi
i	: Lima provinsi di Sumatera (Lampung, Sumatera Selatan, Sumatera Barat, Sumatera Utara, Aceh)
t	: Waktu
ε	: error term

Dalam penelitian ini terdapat perbedaan satuan dan beberapa variabel yang menyebabkan persamaan regresi diharuskan untuk menggunakan model logaritma natural yang bertujuan menyamakan satuan menjadi linier. Agar mampu diestimasi maka persamaan regresi di transformasi ke logaritma berganda. Setelah itu dilakukan pengujian hipotesis untuk menguji validitas hipotesis nol (H_0) berdasarkan data yang digunakan dalam penelitian ini. Pengujian ini bertujuan mengambil keputusan yang didasarkan pada analisis data. Keputusan mengenai apakah hipotesis nol (H_0) diterima atau ditolak bergantung dengan hasil uji statistik yang diperoleh dari data tersebut (Gujarati; Ed5).

1) Uji t

Tujuan uji t untuk menguji apakah ada pengaruh antara variabel penjelas (independent) dengan variabel respon (dependen), dengan melihat perbandingan nilai t-hitung dengan t-tabel (Ekananda, 2015) dan dengan tingkat kepercayaan yaitu 5%. Hipotesis uji t yaitu sebagai berikut

$H_0 : \beta_i \leq 0$ (tidak adanya hubungan positif di antara variabel penjelas dan respon)

$H_a : \beta_i > 0$ (adanya hubungan positif di antara variabel penjelas dan respon)

Dengan kriteria

- Apabila t-Hitung $<$ t-Tabel, maka menerima H_0 atau Prob $> \alpha$ maka H_0 diterima
- Apabila t-Hitung $>$ t-Tabel, maka menerima H_0 atau Prob $< \alpha$ maka H_0 diterima

2) Uji F

Tujuan uji F untuk menguji secara bersama-sama antara semua variabel peubah (penjelas/bebas), untuk mengetahui bagaimana pengaruhnya dengan variabel respon (terikat) dengan tingkat kepercayaan yaitu 5%. Hipotesis uji F yaitu sebagai berikut

$H_0 : \beta_1 = \beta_2$ (tidak adanya pengaruh secara bersama-sama di antar variabel penjelas dengan variabel respon)

$H_a : \beta_1 \neq 0$ atau $\beta_2 \neq 0$ (adanya secara bersama-sama di antar variabel penjelas dengan variabel respon) Dengan kriteria

- Apabila F-Hitung < F-Tabel, maka menerima H_0 atau Prob > α maka H_0 diterima, artinya variabel penjelas tidak berpengaruh secara bersama-sama dengan variabel respon
- Apabila F-Hitung > F-Tabel, maka menerima H_0 atau Prob < α maka H_0 diterima, artinya variabel penjelas tidak berpengaruh secara bersama-sama dengan variabel respon

Koefisien Determinasi (R-Squared)

Menjelaskan seberapa kuatnya variabel penjelas/bebas untuk menjelaskan variasi variabel respon/terikat dalam penelitian tersebut. Angka R^2 yang semakin mendekati angka 1 maka variabel penjelas (peubah) mampu menjelaskan dengan cukup bagus dalam variasi variabel respon. Begitu juga sebaliknya. Selain itu dilakukan juga pengujian asumsi klasik untuk memastikan validitas model, yaitu melalui uji normalitas residual, heteroskedastisitas, autokorelasi, dan multikolinearitas. Seluruh proses analisis data dalam penelitian ini menggunakan perangkat lunak statistik Eviews.

Uji Asumsi Klasik

➤ Deteksi Multikolineritas

Tujuan dari deteksi multikolineritas adalah untuk melihat apakah peubah (variabel-variabel bebas) memiliki hubungan yang tinggi dalam suatu persamaan regresi atau rendah. Pada penelitian ini, untuk mendeteksi adanya multikolineritas peneliti menggunakan metode Variance Inflation Factor (VIF). VIF adalah ukuran yang digunakan pada analisis regresi untuk mengevaluasi seberapa tinggi multikolineritas antara variabel penjelas dalam sebuah model regresi. VIF dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$VIF = \frac{1}{1 - R_j^2}$$

Dimana R_j^2 = koefisien determinasi yang belum disesuaikan untuk meregresi variabel independen ke-j yang tersisa (koefisien determinasi dari *auxiliary regression*).

Kriteria pengujian VIF:

- VIF 1- <5 = Multikolineritas rendah
- VIF 5-10 = Multikolineritas sedang
- VIF ≥ 10 = Multikolineritas tinggi

➤ Uji Heteroskedastisitas

Tujuan dari Uji Heteroskedastisitas yaitu Untuk mengamati apakah varians residual dari pengamatan tersebar secara konstan atau tidak, maka dilakukan uji heteroskedastisitas. Peneliti melakukan pengujian dengan menggunakan metode White.

Yang dilakukan saat uji white menggunakan program eviews:

$$\ln_{it} Y_{it} = \beta_{0i} + \beta_1 X_{1it} + \ln_{it} \beta_2 X_{2it} + u_{it}$$

- Langkah 1: dapatkan penduga residualnya dari EQ_FEM
- Langkah 2: menduga auxiliary regression (menggunakan white no cross terms). Df=5
- Langkah 3 dan 4: formulasikan hipotesis nol dan alternatif lalu cari Chi-kuadrat Hitung.

Hipotesis pengujian heteroskedastisitas:

- H_0 : Homokedastisitas (tidak adanya heteroskedastisitas)
- H_a : adanya heteroskedastisitas

kriteria pengujian:

- Ketika Chi Square-hitung kurang dari Chi Square-tabel maka H_0 diterima, tidak ada masalah heteroskedstisitas (homoskedastis).
- Ketika Chi Square-hitung lebih dari Chi Square-tabel maka H_0 ditolak, ada masalah yaitu gangguan heteroskedstisitas.
- Langkah 5: Kesimpulan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

➤ **Pemilihan Model Regresi**

Sebelum menjalankan analisis regresi pada data panel, langkah awal yang krusial adalah menentukan bentuk model yang paling tepat untuk digunakan. Tiga pendekatan yang umum dipertimbangkan dalam pemodelan data panel adalah Common Effect Model (CEM), Fixed Effect Model (FEM), dan Random Effect Model (REM).

Dalam rangka memastikan hasil estimasi yang valid dan representatif, diperlukan serangkaian uji spesifikasi model. Tiga jenis uji yang digunakan dalam proses seleksi model tersebut meliputi uji Chow untuk membandingkan CEM dan FEM, uji Hausman untuk membandingkan FEM dan REM, serta uji Lagrange Multiplier (LM) untuk menilai kelayakan antara CEM dan REM.

➤ **Pengujian Model Regresi yang Terbaik**

1) Uji Chow

Gambar 4
 Hasil Uji Chow

Redundant Fixed Effects Tests			
Equation: EQ_FEM			
Test cross-section fixed effects			
Effects Test	Statistic	d.f.	Prob.
Cross-section F	1.482286	(4,38)	0.2268
Cross-section Chi-square	6.524630	4	0.1632

Sumber: Hasil dari Olah Data Menggunakan EViews 13, 2025

Berdasarkan gambar 4, hasil uji Chow menunjukkan bahwa nilai probabilitas *Cross-section F* sebesar 0,2268, yang melebihi ambang signifikansi 5% ($0,2268 > 0,05$). Dengan demikian, hipotesis nol (H_0) tidak dapat ditolak, sementara hipotesis alternatif (H_a) ditolak. Artinya, model regresi yang paling sesuai untuk digunakan dalam penelitian ini adalah Common Effect Model (CEM).

2) Uji Hausman

Gambar 5
 Hasil Uji Hausman

Correlated Random Effects - Hausman Test			
Equation: EQ_REM			
Test cross-section random effects			
Test Summary	Chi-Sq. Statistic	Chi-Sq. d.f.	Prob.
Cross-section random	4.139190	2	0.1262

Sumber: Hasil dari Olah Data Menggunakan EViews 13, 2025

Berdasarkan gambar 5, hasil uji Hausman menunjukkan bahwa nilai probabilitas *Cross-section Random* sebesar 0,1262, yang berada di atas tingkat signifikansi 5% ($0,1262 > 0,05$). Berdasarkan nilai tersebut, hipotesis nol (H_0) diterima dan hipotesis alternatif (H_a) ditolak. Hal ini mengindikasikan bahwa model yang paling sesuai adalah Random Effect Model (REM).

Namun, hasil uji spesifikasi sebelumnya, yaitu Uji Chow, menunjukkan bahwa model Common Effect lebih tepat digunakan. Mengingat adanya perbedaan hasil antara kedua uji tersebut, maka diperlukan pengujian tambahan, yakni Uji Lagrange Multiplier (LM), untuk memastikan model panel yang paling tepat digunakan dalam analisis ini.

3) Uji Lagrange Multiplier (LM)

Gambar 6
 Hasil Uji LM

Lagrange Multiplier Tests for Random Effects
 Null hypotheses: No effects
 Alternative hypotheses: Two-sided (Breusch-Pagan) and one-sided (all others) alternatives

	Test Hypothesis		
	Cross-section	Time	Both
Breusch-Pagan	1.114122 (0.2912)	0.509891 (0.4752)	1.624013 (0.2025)
Honda	-1.055520 (0.8544)	0.714066 (0.2376)	-0.241444 (0.5954)

Sumber: Hasil dari Olah Data Menggunakan EViews 13, 2025

Berdasarkan gambar 6, hasil uji Lagrange Multiplier menunjukkan bahwa nilai probabilitas Breusch-Pagan sebesar 0,2025, yang melebihi ambang signifikansi 5% (0,2025 > 0,05). Dengan demikian, hipotesis nol (H₀) tidak ditolak, sedangkan hipotesis alternatif (H_a) ditolak. Hasil ini mengarah pada kesimpulan bahwa model yang paling tepat untuk digunakan dalam penelitian ini adalah Common Effect Model (CEM).

➤ Hasil Analisis Model Data Panel

Berdasarkan hasil dari serangkaian uji spesifikasi model yang telah dilakukan secara bertahap, yaitu Uji Chow, Uji Hausman, dan Uji Lagrange Multiplier (LM), maka disimpulkan bahwa model regresi yang paling tepat digunakan dalam penelitian ini adalah Common Effect Model (CEM). Hal ini didasarkan pada hasil Uji Chow dan Uji LM yang sama-sama menunjukkan bahwa model CEM lebih sesuai dibandingkan model lainnya.

Selanjutnya, regresi dengan pendekatan CEM dilakukan untuk menganalisis pengaruh PDRB sektor industri dan transportasi terhadap emisi karbon di lima provinsi di Sumatera selama periode 2015–2023. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui apakah masing-masing variabel independen berpengaruh signifikan secara parsial terhadap variabel dependen. Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai *t-hitung* terhadap *t-tabel*, sesuai dengan pendekatan yang dijelaskan oleh Ghozali (2018). Hasil estimasi regresi dalam penelitian ini disajikan pada bagian berikutnya.

Gambar 7
 Hasil Regresi Common Effect Model (CEM)

Dependent Variable: LN_Y
 Method: Panel Least Squares
 Date: 05/25/25 Time: 11:52
 Sample: 2015 2023
 Periods included: 9
 Cross-sections included: 5
 Total panel (balanced) observations: 45

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	26.07453	7.418604	3.514749	0.0011
LN_X1	0.447659	0.230740	1.940105	0.0591
LN_X2	-1.200591	0.443480	-2.707205	0.0098

Sumber: Hasil dari Olah Data Menggunakan EViews 13, 2025

Berdasarkan hasil regresi data panel menggunakan metode Common Effect Model (CEM), diperoleh persamaan regresi log-lin sebagai berikut:

$$\widehat{\text{Ln}}_Y_{it} = \beta_{0i} + \beta_1 X_{1it} + \beta_2 \text{Ln}_X_{2it} + \varepsilon_{it}$$

$$\widehat{\text{Ln}}_Y_{it} = 26.07453 + 0.447659 \text{Ln}_X_{1it} - 1.200591 \text{Ln}_X_{2it}$$

Keterangan:

- Y (Dependen) = Emisi CO2
- X₁ (Independen) = PDRB sektor Industri
- X₂ (Independen) = PDRB sektor transportasi
- i = Provinsi (Lampung, Sumatera Selatan, Sumatera Barat, Sumatera Utara, Aceh)
- t = Periode Waktu (2015-2023)

Ln = Logaritma Natural

Berdasarkan hasil estimasi model regresi panel menggunakan pendekatan Common Effect Model (CEM), diperoleh konstanta sebesar 26,07453. Secara matematis, nilai ini merupakan logaritma alami dari rata-rata emisi karbon dioksida (CO₂) ketika nilai PDRB sektor industri dan transportasi dianggap nol. Namun, secara ekonomi nilai konstanta ini tidak diinterpretasikan secara praktis, karena secara nyata kedua sektor tersebut tidak mungkin bernilai nol. Meski demikian, keberadaan konstanta tetap diperlukan sebagai bagian dari struktur persamaan regresi log-lin.

Variabel PDRB sektor industri memiliki koefisien sebesar 0,447659, yang berarti setiap peningkatan 1% dalam PDRB sektor industri akan meningkatkan emisi CO₂ sebesar sekitar 0,45%, dengan asumsi variabel lain konstan. Temuan ini menunjukkan bahwa aktivitas industri di lima provinsi Sumatera memberikan kontribusi langsung terhadap kenaikan emisi karbon. Hal ini sejalan dengan teori ekonomi lingkungan yang menyatakan bahwa peningkatan produksi industri sering diikuti oleh peningkatan konsumsi energi dan pelepasan emisi.

Sementara itu, variabel PDRB sektor transportasi memiliki koefisien sebesar -1,200591, yang mengindikasikan bahwa peningkatan 1% pada sektor ini justru menurunkan emisi CO₂ sebesar sekitar 1,20%. Hasil ini menarik karena menunjukkan bahwa pertumbuhan sektor transportasi tidak selalu identik dengan peningkatan polusi. Kemungkinan ini dapat dikaitkan dengan adanya efisiensi transportasi, adopsi teknologi ramah lingkungan, atau pergeseran penggunaan moda transportasi yang lebih bersih di wilayah Sumatera. Koefisien negatif ini juga signifikan secara statistik, sehingga perlu diperhatikan lebih lanjut dalam penyusunan kebijakan berbasis sektor.

Uji Statistik

➤ **Uji Parsial (uji t)**

Gambar 8
 Hasil Uji t

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	26.07453	7.418604	3.514749	0.0011
LN_X1	0.447659	0.230740	1.940105	0.0591
LN_X2	-1.200591	0.443480	-2.707205	0.0098

Sumber: Hasil dari Olah Data Menggunakan EVIEWS 13, 2025

a) Uji Koefisien regresi β_1 (PDRB industri)

Hasil uji t menunjukkan bahwa nilai probabilitas untuk variabel PDRB sektor industri sebesar 0,0591, yang lebih kecil dari tingkat signifikansi 10% namun masih lebih besar dari 5%. Oleh karena itu, pada tingkat kepercayaan 90%, dapat disimpulkan bahwa PDRB sektor industri berpengaruh signifikan secara positif terhadap emisi karbon dioksida (CO₂) di lima provinsi Sumatera. Hal ini berarti, setiap peningkatan 1% pada PDRB sektor industri akan mendorong peningkatan emisi CO₂ sebesar sekitar 0,45%, dengan asumsi variabel lain tetap (ceteris paribus). Temuan ini konsisten dengan literatur yang menyatakan bahwa aktivitas industri menjadi salah satu sumber utama peningkatan emisi karbon, terutama di wilayah dengan intensitas produksi yang tinggi.

b) Uji Koefisien regresi β_2 (PDRB Transportasi)

Berdasarkan hasil uji t, variabel PDRB sektor transportasi menunjukkan pengaruh yang signifikan secara negatif terhadap emisi CO₂, dengan nilai probabilitas sebesar 0,0098 (lebih kecil dari 5%). Koefisien regresi sebesar -1,2006 mengindikasikan bahwa setiap peningkatan 1% pada PDRB transportasi akan menurunkan emisi CO₂ sekitar 1,20%. Hasil ini dapat dijelaskan oleh kondisi geografis Sumatera yang masih memiliki kawasan hutan luas sebagai penyerap karbon, serta peningkatan efisiensi transportasi akibat pembangunan infrastruktur seperti jalan tol dan sistem logistik. Selain itu, pertumbuhan ekonomi sektor transportasi kemungkinan lebih banyak ditopang oleh moda transportasi yang relatif lebih ramah lingkungan seperti laut dan kereta api.

➤ **Uji F (Pengujian Hipotesis Secara Bersama-sama)**

Gambar 9
 Hasil Uji F

F-statistic	4.580573
Prob(F-statistic)	0.015867

Sumber: Hasil dari Olah Data Menggunakan EViews 13, 2025

Hasil uji F menunjukkan nilai statistik F sebesar 4,580573 dengan probabilitas 0,0159, yang lebih kecil dari tingkat signifikansi 5% ($0,0159 < 0,05$). Hal ini menunjukkan bahwa secara simultan, variabel independen PDRB sektor industri (Ln_X1) dan PDRB sektor transportasi (Ln_X2) berpengaruh signifikan terhadap emisi karbon dioksida (CO_2). Artinya, kedua variabel tersebut secara bersama-sama mampu menjelaskan variasi emisi karbon di lima provinsi Sumatera dalam periode 2015–2023.

Koefisien Determinasi

Gambar 10
 Koefisien Determinasi

R-squared	0.179065
Adjusted R-squared	0.139972

Sumber: Hasil dari Olah Data Menggunakan EViews 13, 2025

Nilai R-squared sebesar 0,1791 mengindikasikan bahwa sekitar 17,91% variasi emisi CO_2 dapat dijelaskan oleh perubahan PDRB sektor industri dan transportasi dalam model ini. Sementara sisanya sebesar 82,09% dijelaskan oleh variabel lain di luar model. Meskipun nilai R-squared tergolong rendah, hal ini masih wajar dalam penelitian ekonomi regional dan lingkungan karena emisi karbon sangat dipengaruhi oleh banyak faktor lain seperti konsumsi energi rumah tangga, aktivitas nonformal, kebijakan lingkungan, serta kondisi geografis yang tidak semua dapat dimasukkan ke dalam model regresi. Yang terpenting, hasil uji F menunjukkan bahwa model tetap layak secara statistik.

Uji Asumsi Klasik

➤ **Deteksi Multikolinieritas**

Deteksi multikolinieritas tujuannya untuk melihat apakah pada persamaan model regresi ditemukan adanya hubungan yang kuat atau tidak antar variabel variabel penjelas (bebas). Disini peneliti menggunakan Variance Inflation Factor (VIF) untuk mendeteksi adanya multikolinieritas. Apabila nilai VIF antara 1-5 maka multikolinieritas rendah, nilai VIF 6-10 multikolinieritas sedang, dan VIF yang lebih besar dari 10 maka ada multikolinieritas yang tinggi.

Dalam deteksi multikolinieritas data panel dengan VIF berbeda dengan cara biasanya, dalam data panel estimasi masing-masing variabel bebas dengan variabel bebas lainnya lalu ambil masing-masing R-Squared-nya.

- $Ln_X_1 = f(Ln_X_2)$
- $Ln_X_2 = f(Ln_X_1)$

Maka hasil VIF yang didapatkan adalah:

Tabel 1
 Hasil deteksi Multikolinieritas

Variabel	R-Squared	VIF = $1 / (1 - R\ Squared)$
Ln_X1	0.052930	1.06
Ln_X2	0.052930	1.06

Sumber: Hasil dari Olah Data Penulis, Eviews 13

Berdasarkan Tabel 1, nilai VIF untuk kedua variabel independen yaitu Ln_X1 (PDRB Industri) dan Ln_X2 (PDRB Transportasi) sama-sama sebesar 1,06. Mengacu pada batasan umum, model regresi dikatakan bebas dari masalah multikolinieritas apabila nilai VIF < 10 , atau bahkan < 5 untuk standar yang lebih ketat. Karena seluruh nilai VIF dalam model ini berada jauh di bawah angka 10, maka dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat gejala multikolinieritas antar variabel independen dalam model regresi ini. Dengan demikian, hubungan antar variabel bebas dinyatakan stabil dan tidak saling mempengaruhi secara berlebihan.

➤ **Uji Heteroskedastisitas**

Tujuan dari Uji Heteroskedastisitas yaitu Untuk mengamati apakah varians residual dari pengamatan tersebar secara konstan atau tidak, maka dilakukan uji heteroskedastisitas. Peneliti melakukan pengujian dengan menggunakan metode White.

Gambar 11
Hasil Uji Heteroskedastisitas

Dependent Variable: RESID01^2
Method: Panel Least Squares
Date: 05/25/25 Time: 14:05
Sample: 2015 2023
Periods included: 9
Cross-sections included: 5
Total panel (balanced) observations: 45

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	568.7046	843.1322	0.674514	0.5040
LN_X1	31.31572	19.65050	1.593635	0.1191
LN_X2	-100.4621	106.7528	-0.941073	0.3525
LN_X1^2	-0.299912	1.404842	-0.213485	0.8321
LN_X2^2	3.672417	2.559130	1.435026	0.1593
LN_X1*LN_X2	-1.267094	2.484769	-0.509945	0.6130
R-squared	0.387322	Mean dependent var	2.001862	
Adjusted R-squared	0.308773	S.D. dependent var	3.276019	

Sumber: Hasil dari Olah Data Menggunakan EVIEWS 13, 2024

Kita ringkas bahwa:

R-squared regresi auxiliary= 0.387322

Chi-kuadrat hitung = $n \times R\text{-Squared Regresi auxiliary} = 45 \times 0.387322 = 17.42949$

Chi-kuadrat tabel dengan alpha 0.05 dan d.f=5 (banyaknya variabel bebas dalam regresi auxiliary) = 11.0705

Karena nilai Chi square hitung = 62.361 lebih dari nilai Chi-square tabel = 11.0705, maka bisa diputuskan H_0 ditolak yang artinya ada masalah heteroskedastisitas pada data ini, yang mengindikasikan bahwa varians residual tidak menyebar secara konstan di seluruh pengamatan.

Pembahasan

- **Pengaruh PDRB Sektor Industri terhadap Emisi Karbon di Lima Provinsi Sumatera**
Hasil regresi menunjukkan bahwa PDRB sektor industri memiliki pengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂ pada tingkat signifikansi 10%. Koefisien regresi sebesar 0,447659 mengindikasikan bahwa peningkatan sebesar 1% pada PDRB sektor industri akan meningkatkan emisi CO₂ sebesar 0,45%, dengan asumsi variabel lain tetap konstan (*ceteris paribus*). Temuan ini mendukung hasil penelitian Akbar Maulana Ramadhan (2023) yang menunjukkan bahwa aktivitas industri di wilayah Sumatera secara signifikan menurunkan kualitas lingkungan akibat eksternalitas negatif dari proses produksi, seperti limbah dan gas rumah kaca. Hasil ini juga konsisten dengan penelitian Humaira Rizka Ramadhanti (2023), yang menekankan bahwa aktivitas industri pengolahan berpotensi besar dalam memengaruhi pencemaran udara, tergantung pada bentuk dan skala industrinya. Selain itu, temuan ini sejalan dengan penelitian Syafina Hela dan Marlina Ekawaty (2024) yang menemukan bahwa PDRB sektor industri di Provinsi Jawa Tengah memiliki pengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂, di mana peningkatan aktivitas industri berdampak langsung pada naiknya volume emisi karbon. Irfan Bagus Triyanto (2024) juga menunjukkan bahwa sektor industri merupakan salah satu penyumbang utama emisi CO₂ di Indonesia, terutama akibat tingginya ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dalam proses produksi. Dengan demikian, terdapat keterkaitan yang kuat antara pertumbuhan sektor industri dengan meningkatnya emisi CO₂, yang mencerminkan perlunya kebijakan pengendalian emisi dan adopsi teknologi ramah lingkungan dalam sektor ini.
- **Pengaruh PDRB Sektor Transportasi terhadap Emisi Karbon di Lima Provinsi Sumatera**
Menariknya, variabel PDRB sektor transportasi dalam penelitian ini menunjukkan pengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi CO₂, dengan koefisien regresi sebesar -1,200591 pada tingkat signifikansi 5%. Artinya, peningkatan sebesar 1% dalam PDRB sektor transportasi justru menurunkan emisi CO₂ sebesar 1,20%, dengan asumsi variabel lain tetap konstan. Temuan ini selaras dengan temuan Syafina Hela dan Marlina Ekawaty (2024) yang menunjukkan bahwa di Provinsi Jawa Tengah, peningkatan PDRB sektor transportasi justru berkorelasi negatif terhadap emisi CO₂, yang dijelaskan oleh meningkatnya penggunaan transportasi umum seperti BRT Trans Jateng dan kereta api lokal. Temuan ini mengindikasikan bahwa di wilayah tertentu, pertumbuhan ekonomi di sektor transportasi tidak selalu identik dengan peningkatan emisi, khususnya ketika pertumbuhan tersebut didorong oleh moda transportasi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Dalam konteks wilayah Sumatera, perbedaan ini dapat dijelaskan oleh faktor geografis seperti tutupan hutan yang masih luas dan berperan sebagai penyerap karbon alami, serta potensi adanya peningkatan efisiensi sistem transportasi atau pergeseran penggunaan moda transportasi yang lebih bersih. Oleh karena itu, hubungan negatif antara PDRB sektor transportasi dan emisi CO₂ dalam penelitian ini mencerminkan bahwa pertumbuhan sektor transportasi belum sepenuhnya ditranslasikan ke dalam bentuk aktivitas bermotor beremisi tinggi, dan justru dapat mendukung perbaikan kualitas lingkungan bila diarahkan dengan strategi yang tepat.

KESIMPULAN

Pertama, hasil penelitian menunjukkan bahwa PDRB sektor industri di lima provinsi Sumatera berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi karbon dioksida (CO₂), yang mengindikasikan bahwa pertumbuhan industri masih erat kaitannya dengan peningkatan emisi gas rumah kaca. Kedua, PDRB sektor transportasi justru menunjukkan pengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi CO₂, yang mengisyaratkan adanya perbaikan efisiensi transportasi atau peran penyerapan emisi oleh tutupan lahan hijau di wilayah Sumatera. Ketiga, secara bersama-sama kedua variabel tersebut berpengaruh signifikan terhadap emisi CO₂, meskipun nilai koefisien determinasi masih rendah, yang menunjukkan bahwa faktor-faktor lain di luar model juga turut memengaruhi perubahan emisi.

Secara akademis, hasil ini memberikan kontribusi pada literatur mengenai hubungan antara pertumbuhan ekonomi sektoral dan dampaknya terhadap lingkungan di tingkat regional. Penelitian ini mendukung pandangan bahwa kebijakan pembangunan tidak dapat dilepaskan dari pertimbangan lingkungan. Oleh karena itu, pemerintah daerah di Sumatera perlu menyeimbangkan pertumbuhan sektor industri dan transportasi dengan penerapan kebijakan lingkungan, seperti mendorong efisiensi energi, penerapan teknologi ramah lingkungan, serta perlindungan terhadap kawasan hutan sebagai penyeimbang emisi karbon.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada jumlah variabel independen yang masih terbatas dan tidak mencakup faktor lingkungan lainnya seperti konsumsi energi, luas lahan hijau, dan urbanisasi. Selain itu, cakupan wilayah hanya melibatkan lima provinsi di Sumatera sehingga belum mewakili keseluruhan karakteristik kawasan. Oleh karena itu, studi selanjutnya dapat memperluas cakupan wilayah serta memasukkan variabel-variabel yang lebih komprehensif untuk mengukur faktor penyebab emisi karbon secara lebih akurat, termasuk aspek kebijakan lingkungan dan adopsi teknologi energi terbarukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, Suci, and Syamsul Hadi. (2021). "Analisis Faktor Yang Mempengaruhi Produk Domestik Regional Bruto Di Provinsi Jawa Barat Tahun 2015-2019." *Jurnal Ilmu Ekonomi JIE* 5 (4): 690-700. <https://doi.org/10.22219/jie.v5i04.17826>.
- Bakri, Nurul Aulya, Suwardi Annas, and Muhammad Kasim Aidid. (2024). "Pendekatan Geographically Weighted Regression (GWR) Untuk Menganalisis Hubungan PDRB Sektor Pertanian, Kehutanan, Dan Perikanan Dengan Faktor Pencemaran Lingkungan Di Jawa Timur." *VARIANSI: Journal of Statistics and Its Application on Teaching and Research* 6 (1): 11. <https://doi.org/10.35580/variansiunm194>.
- BPS. (2025). *Produk Domestik Regional Bruto per Kapita Atas Dasar Harga Berlaku Menurut Provinsi (ribu rupiah), 2024*. Diambil kembali dari BPS: <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/3/YWtoQIRVZzNiMU5qU1VOSIRFeFZiRTR4VDJOTVVUMDkjMw%3D%3D/produk-domestik-regional-bruto-per-kapita-atas-dasar-harga-berlaku-menurut-provinsi--ribu-rupiah---2022.html?year=2024>
- BPS. (2020). *Produk Domestik Regional Bruto Provinsi Aceh Menurut Lapangan Usaha 2015-2019*. Diambil kembali dari BPS: <https://aceh.bps.go.id/id/publication/2020/04/30/81d3ca7a81b482ad93f3293c/produk-domestik-regional-bruto-provinsi-aceh-menurut-lapangan-usaha-2015-2019.html>
- BPS. (2023). *Produk Domestik Regional Bruto Provinsi Aceh Menurut Lapangan Usaha 2018-2022*. Diambil kembali dari BPS: <https://aceh.bps.gou.id/id/publication/2023/04/05/92eed0faf20cb4c4cfa4d352/produk-domestik-regional-bruto-provinsi-aceh-menurut-lapangan-usaha-2018-2022.html>
- BPS. (2024). *Produk Domestik Regional Bruto Provinsi Aceh Menurut Lapangan Usaha 2019-2024*. Diambil kembali dari BPS: <https://aceh.bps.go.id/id/publication/2024/04/05/52fe87f62b378b90fdbd24b0/produk-domestik-regional-bruto-provinsi-aceh-menurut-lapangan-usaha-2019-2023.html>
- BPS. (2020). *Produk Domestik Regional Bruto Provinsi Lampung Menurut Lapangan Usaha 2015-2019*. Diambil kembali dari BPS:

- <https://lampung.bps.go.id/id/publication/2020/04/30/b75a7ba008b7b84bd2abfb47/produk-domestik-regional-bruto-provinsi-lampung-menurut-lapangan-usaha-2015-2019.html>
- BPS. (2023). *Produk Domestik Regional Bruto Provinsi Lampung Menurut Lapangan Usaha 2018-2022*. Diambil kembali dari BPS: <https://lampung.bps.go.id/id/publication/2023/04/05/fbb119e12e81fb920d35b0dc/produk-domestik-regional-bruto-provinsi-lampung-menurut-lapangan-usaha-2018-2022.html>
- BPS. (2024). *Produk Domestik Regional Bruto Provinsi Lampung Menurut Lapangan Usaha 2019-2023*. Diambil kembali dari BPS: <https://lampung.bps.go.id/id/publication/2024/04/04/190ba1acb15924a762ac9611/produk-domestik-regional-bruto-provinsi-lampung-menurut-lapangan-usaha-2019-2023.html>
- BPS. (2020). *Produk Domestik Regional Bruto Provinsi Sumatera Barat Menurut Lapangan Usaha 2015-2019*. Diambil kembali dari BPS: <https://sumbar.bps.go.id/id/publication/2020/04/30/b9eaf0018f9319a29f07272d/produk-domestik-regional-bruto-provinsi-sumatera-barat-menurut-lapangan-usaha-2015-2019.html>
- BPS. (2024). *Produk Domestik Regional Bruto Provinsi Sumatera Barat Menurut Lapangan Usaha 2019-2023*. Diambil kembali dari BPS: <https://sumbar.bps.go.id/id/publication/2024/04/04/2183ec73e7a3e20e25097122/produk-domestik-regional-bruto-provinsi-sumatera-barat-menurut-lapangan-usaha-2019-2023.html>
- BPS. (2020). *Produk Domestik Regional Bruto Provinsi Sumatera Selatan Menurut Lapangan Usaha 2015-2019*. Diambil kembali dari BPS: <https://sumsel.bps.go.id/id/publication/2020/04/30/37cd3dc6bf041034fb8539a0/produk-domestik-regional-bruto-provinsi-sumatera-selatan-menurut-lapangan-usaha-2015-2019.html>
- BPS. (2023). *Produk Domestik Regional Bruto Provinsi Sumatera Selatan Menurut Lapangan Usaha 2018-2022*. Diambil kembali dari BPS: <https://sumsel.bps.go.id/id/publication/2023/04/05/223e6753433e77cf951e6234/produk-domestik-regional-bruto-provinsi-sumatera-selatan-menurut-lapangan-usaha-2018-2022.html>
- BPS. (2020). *Produk Domestik Regional Bruto Provinsi Sumatera Utara Menurut Lapangan Usaha 2015-2019*. Diambil kembali dari BPS: <https://sumut.bps.go.id/id/publication/2020/04/30/570d3c25b0be417723b517f3/produk-domestik-regional-bruto-provinsi-sumatera-utara-menurut-lapangan-usaha-2015-2019.html>
- BPS. (2024). *Produk Domestik Regional Bruto Provinsi Sumatera Utara Menurut Lapangan Usaha 2019-2023*. Diambil kembali dari BPS: <https://sumut.bps.go.id/id/publication/2024/04/04/eae6022c65f8b0e7ebe17f42/produk-domestik-regional-bruto-provinsi-sumatera-utara-menurut-lapangan-usaha-2019-2023.html>
- Di, K. D. (2024). *DAN GAS TERHADAP EMISI KARBON DIOKSIDA DI INDONESIA TAHUN 2010 – 2022 SKRIPSI Untuk Memenuhi Persyaratan Mencapai Gelar Sarjana Ekonomi Program Studi Ilmu Ekonomi Disusun Oleh : Irfan Bagus Triyanto HALAMAN PENGESAHAN iii.*
- Esther, Astrid Maria, and Agustina Suparyati. (2023). "Pengaruh Kinerja Perekonomian Terhadap Kualitas Lingkungan Hidup Di Indonesia." *Media Ekonomi* 31 (1): 29–44. <https://doi.org/10.25105/me.v31i1.16231>.
- Esther, Astrid Maria, and Agustina Suparyati. (2023). "Terhadap Kualitas Lingkungan Hidup Di Indonesia" 31 (1): 29–44.
- Faris, N. A. (2022). Analisis Pengaruh PDRB Sektor Pertanian, Industri, Dan Transportasi Terhadap Emisi Karbondioksida Di Provinsi Jawa Timur. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa FEB*. <https://jimfeb.ub.ac.id/index.php/jimfeb/article/view/8176>
- Fatiha, Naafia, Nur Insani, and Hendarto Robertus. (2024). "ANALISIS ENVIRONMENTAL KUZNETS CURVE PADA PDRB SEKTORAL TERHADAP EMISI GAS RUMAH KACA DI PROVINSI JAWA TIMUR TAHUN 1990-2022" 13 (3): 9–21.
- Fitri, Yulia, Anggi Nadia Putri, and Sri Fitria Retnawaty. (2020). "Estimasi Emisi CO2 Dari Sektor Rumah Tangga Di Kota Pekanbaru." *Photon: Jurnal Sain Dan Kesehatan* 11 (1): 1–6. <https://doi.org/10.37859/jp.v11i1.2061>.
- Gujarati, Damodar, N., & Porter, Dawn, C. (2023). *dasar – dasar ekonometrika edisi 5, buku 2*. Jakarta: Salemba Empat
- Gupito R.N, Johanna M. (2013). "Keterkaitan PDRB Perkapita dari Sektor Industri, Transportasi, Pertanian, dan Kehutanan Terhadap Kualitas Lingkungan Diukur dari Emisi CO2 di Jawa Tengah." *Jurnal Ilmu Ekonomi Diponegoro* 2 (1):1–6.
- Hania Cholily, Vebrina. (2023). "Pengaruh PDRB Perkapita Sektor Industri, Kehutanan Dan Pertanian Terhadap Kualitas Lingkungan." *COMSERVA : Jurnal Penelitian Dan Pengabdian Masyarakat* 3 (07): 2636–46. <https://doi.org/10.59141/comserva.v3i07.1060>.

- Hela, S., & Ekawaty, M. (2024). Pengaruh Pdrb Sektor Industri, Transportasi, Dan Pertanian Terhadap Emisi Co2 Di Provinsi Jawa Tengah. *Journal of Development Economic and Social Studies*, 3(2), 522–536. <https://doi.org/10.21776/jdess.2024.03.2.15>
- Helda, Nur Phazillah, Abd Jamal, and Taufiq C. Dawood. (2018). "The Influence of Urbanization, GDP Growth in The Industrial Sector and GDP Growth in The Transportation Sector on Environmental Pollution in Indonesia." *Jurnal Ekonomi Dan Kebijakan Publik Indonesia* 5 (2): 168–83.
- Humas. (2019). *Investasi Manufaktur Diyakini Semakin Moncer Seusai Pemilu*. Sekretariat Kabinet Republik Indonesia. <https://setkab.go.id/investasi-manufaktur-diyakini-semakin-moncer-seusai-pemilu/>
- Kemenkeu. (2022). *Program Pemulihan Ekonomi Nasional (PEN)*. <https://pen.kemenkeu.go.id/in/post/mengapa-program-pen>
- Kristiana, Neni, Lorentino Togar Laut, and Jalu Aji Prakoso. (2021). "Pengaruh Konsumsi Energi Dan Deforestasi Terhadap Output Nasional Lima Negara Anggota ASEAN." *Jurnal Ekonomi Pembangunan* 10 (2): 105–12. <https://doi.org/10.23960/jep.v10i2.278>.
- Luhung, Suci Utami Adi, and Aisyah Fitri Yuniasih. (2023). "Faktor-Faktor Yang Memengaruhi Indeks Kualitas Lingkungan Hidup Di Indonesia, 2017-2021." *Seminar Nasional Official Statistics 2023* (1): 787–96. <https://doi.org/10.34123/semnasoffstat.v2023i1.1850>.
- Maulida, Ana Kurnia, Lucia Rita Indrawati, and Panji Kusuma Prasetyo. (2018). "Analisis Determinasi Pertumbuhan Ekonomi Di Kawasan ASEAN Periode Tahun 2007-2018." *DINAMIC: Directory Journal of Economic* 2 (1): 15–32. <https://media.neliti.com/media/publications/371082-none-bf8db842.pdf>.
- Muttaqin, Ecky Imamul, Ganjar Primambudi, Susilo Nur, and Aji Cokro. (2024). "Unveiling the Dynamics of Economic Growth, Carbon Emissions, and Energy Consumption in Indonesia: A Wavelet Analysis Model" 25 (October).
- Nauli, Cinthia, Mauna Th B Maramis, and Dennij Mandei. (2024). "Analisis Pengaruh Net Ekspor Dan Nilai Tukar Mata Uang Terhadap Pertumbuhan Ekonomi Di Kawasan Negara Asean Periode 2012-2021." *Jurnal Berkala Ilmiah Efisiensi* 24 (2): 109–20.
- Novitasari, Diah Ayu. (2015). "Spatial Pattern Analysis Dan Spatial Autocorrelation Produk Domestik Regional Bruto (Pdrb) Sektor Industri Untuk Menggambarkan Perekonomian Penduduk Di Jawa Timur." *Jurnal Ekbis* 13 (1): 9. <https://doi.org/10.30736/ekbis.v13i1.113>.
- Putri, F. Z., Karimi, K., Hamdi, M., Bakaruddin, B., & Rahayu, N. I. (2022). Analisis Pengaruh Pertumbuhan Ekonomi, Jumlah Industri, Penanaman Modal Asing Dan Kemiskinan Terhadap Emisi Co2 Di Indonesia. *Jurnal Akuntansi Dan Ekonomika*, 12(2), 221–228. <https://doi.org/10.37859/jae.v12i2.4302>
- Ramadhan, Akbar Maulana. (2023). "Dampak Pertumbuhan Ekonomi Terhadap Kualitas Lingkungan Hidup Di Provinsi Pulau Sumatera." *Jurnal Penelitian Ekonomi Manajemen Dan Akuntansi* 1 (2): 1–12. <https://jsr.lib.ums.ac.id/index.php/determinasi>.
- SiPongi. (2025). *Emisi CO₂ dari Kebakaran Hutan dan Lahan (Ton CO₂e) Per Provinsi di Indonesia Tahun 2018-2025*. Diambil kembali dari SiPongi: <https://sipongi.menlhk.go.id/emisi-co2>
- Sofaniadi, Safrinal, P. Purwanto, and B Riyanto. (2022). "Potential for Co2 Emissions in Transportation Sector and Reduction Strategies Analysis Related to Greenhouse Gas in Semarang." *Ecodevelopment* 4 (2): 32–34. <https://doi.org/10.24198/ecodev.v4i2.39145>.
- Utomo, Langgeng Bangkit, Tetuko Rawidyo Putro, and Suryanto. (2020). "Pembangunan Manusia Terhadap Emisi Karbondioksida," 203–7.