

PREDIKSI PENGARUH EMISI KARBON TERHADAP PERUBAHAN IKLIM DUNIA MENGGUNAKAN ALGORITMA REGRESI LINIER

Arinda Sukma Dewi, M. Cahyo Saputra, Elsa Alawiyah Ritonga, Rahmadden, Lusiana Efrizoni

Teknik Informatika, Universitas Sains dan Teknologi Indonesia

Jalan Raya Karanglo km 2 Malang, Indonesia

2310031802063@sar.ac.id

ABSTRAK

Perubahan iklim merupakan permasalahan global yang semakin mendapat perhatian karena berkaitan erat dengan peningkatan emisi karbon akibat aktivitas manusia. Meskipun berbagai penelitian telah membahas hubungan keduanya, diperlukan analisis berbasis data untuk memahami pengaruh emisi karbon terhadap perubahan iklim dunia. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh emisi karbon terhadap perubahan iklim dunia serta membangun model prediksi menggunakan algoritma regresi linier. Penelitian dilakukan dengan pendekatan kuantitatif menggunakan data sekunder periode 2019–2024 yang diperoleh dari World Bank dan Our World in Data. Tahapan penelitian meliputi pengumpulan data, preprocessing, pemodelan regresi linier, dan evaluasi model menggunakan koefisien determinasi (R^2), Mean Squared Error (MSE), dan Mean Absolute Error (MAE). Hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan antara emisi karbon dan indikator perubahan iklim yang dianalisis. Model regresi linier yang dibangun menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,8256 dengan nilai MAE sebesar 0,0009, yang menunjukkan kemampuan model dalam menggambarkan pola data dengan tingkat kesalahan yang rendah. Selain itu, hasil prediksi menunjukkan kecenderungan penurunan intensitas karbon dunia pada beberapa tahun mendatang. Temuan ini menunjukkan bahwa regresi linier dapat digunakan sebagai pendekatan untuk menganalisis pengaruh emisi karbon terhadap perubahan iklim dunia.

Kata kunci : Emisi Karbon, Perubahan Iklim, Pemanasan Global, Regresi Linier, Data Sekunder, Prediksi

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim merupakan fenomena global yang ditandai oleh peningkatan suhu rata-rata bumi, perubahan pola curah hujan, serta meningkatnya frekuensi kejadian cuaca ekstrem [1]. Fenomena ini sebagian besar disebabkan oleh meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer, khususnya karbon dioksida (CO_2), yang dihasilkan dari aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil, aktivitas industri, transportasi, serta perubahan penggunaan lahan. Peningkatan emisi karbon menyebabkan terjadinya efek rumah kaca yang memicu pemanasan global dan berdampak langsung terhadap sistem iklim [2].

Indonesia sebagai negara berkembang mengalami peningkatan emisi karbon seiring dengan pertumbuhan ekonomi, industrialisasi, dan peningkatan konsumsi energi. Aktivitas ekonomi yang intensif tersebut memberikan kontribusi signifikan terhadap meningkatnya emisi karbon yang berdampak pada kondisi lingkungan dan iklim nasional [3]. Studi empiris di kawasan ASEAN menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi dan konsumsi energi memiliki pengaruh positif terhadap peningkatan emisi karbon, termasuk di Indonesia

Peningkatan suhu global dan perubahan iklim yang terjadi selama satu dekade terakhir merupakan hasil dari peningkatan emisi CO_2 [4]. Analisis kuantitatif menunjukkan bahwa peningkatan emisi CO_2 dan perubahan suhu rata-rata global memiliki korelasi linear positif, yang diinvestigasi melalui model regresi statistik pada data CO_2 dan suhu global [5]. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa emisi karbon

merupakan salah satu variabel penting dalam menganalisis perubahan iklim.

Meskipun hubungan antara emisi karbon dan pemanasan global telah banyak dibahas, tantangan utama saat ini terletak pada keterbatasan model kuantitatif yang dapat memprediksi dampak tersebut secara presisi dalam rentang waktu jangka pendek, khususnya pada periode transisi energi pasca-pandemi. Masalah krusial muncul ketika data tahunan menunjukkan adanya fluktuasi emisi yang tidak selalu diikuti oleh perubahan suhu secara instan, sehingga menciptakan celah dalam pemahaman mengenai seberapa cepat dampak emisi karbon bermanifestasi terhadap perubahan iklim dunia. Selain itu, terdapat kebutuhan mendesak untuk memverifikasi apakah model regresi linier sederhana masih memiliki tingkat akurasi yang memadai untuk menjelaskan anomali suhu global di tengah dinamika emisi karbon per kapita yang sangat bervariasi antar negara.

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan, penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut: (1) menganalisis hubungan antara emisi karbon dan perubahan iklim dunia secara kuantitatif menggunakan metode regresi linier sederhana; (2) membangun model prediksi berbasis regresi linier yang mampu menggambarkan pengaruh emisi karbon terhadap indikator perubahan iklim, khususnya suhu rata-rata tahunan; serta (3) mengevaluasi tingkat akurasi dan relevansi model regresi linier dalam menjelaskan dinamika emisi karbon pada periode 2019–2024, termasuk di tengah perubahan pola konsumsi energi pasca-pandemi.

Beberapa penelitian terdahulu telah berfokus pada

analisis emisi karbon dalam skala regional, seperti studi empiris di kawasan ASEAN yang mengaitkan pertumbuhan ekonomi dengan peningkatan emisi. Penelitian lain oleh [6] telah memberikan bukti hubungan linier antara karbon dan pemanasan global, namun sering kali menggunakan data historis jangka panjang yang tidak mencakup dinamika tahun terbaru. Posisi penelitian ini adalah untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan memfokuskan analisis pada data terkini periode 2019–2024, di mana terjadi perubahan signifikan dalam pola konsumsi energi global. Dengan menerapkan metode regresi linier pada data primer dari sumber seperti *World Bank* dan *Our World in Data*, penelitian ini bertujuan untuk menguji kembali relevansi model linier dalam memprediksi indikator perubahan iklim di era modern.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu kajian kuantitatif yang dapat menjelaskan secara empiris pengaruh emisi karbon terhadap perubahan iklim dunia. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan metode regresi linier sederhana untuk menganalisis hubungan antara emisi karbon dan perubahan iklim dunia.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Emisi Karbon

Emisi karbon merupakan pelepasan unsur karbon ke atmosfer, terutama dalam bentuk karbon dioksida (CO₂), yang berasal dari aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil, kegiatan industri, transportasi, dan deforestasi [7]. Emisi karbon termasuk dalam kelompok gas rumah kaca yang berperan dalam meningkatkan suhu bumi melalui mekanisme efek rumah kaca. Peningkatan emisi karbon sering digunakan sebagai indikator dampak aktivitas manusia terhadap lingkungan dan perubahan iklim, karena emisi CO₂ yang dilepaskan dari pembakaran bahan bakar fosil dan aktivitas industri telah menjadi salah satu penyebab utama percepatan pemanasan global serta gangguan sistem iklim global[8]

2.2. Perubahan Iklim

Perubahan iklim adalah perubahan jangka panjang pada pola iklim global maupun regional yang meliputi perubahan suhu rata-rata, curah hujan, dan intensitas cuaca ekstrem. Perubahan ini dipengaruhi oleh faktor alami dan aktivitas manusia, terutama peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Pada tingkat global, perubahan iklim telah memberikan dampak signifikan terhadap berbagai sektor, termasuk pertanian, ketersediaan sumber daya air, serta meningkatnya risiko bencana alam di berbagai belahan dunia [9].

2.3. Hubungan Emisi Karbon dengan Perubahan Iklim

Hubungan antara emisi karbon dan perubahan iklim dijelaskan melalui teori efek rumah kaca, di mana peningkatan konsentrasi karbon dioksida di

atmosfer menyebabkan panas matahari terperangkap dan meningkatkan suhu permukaan bumi temuan[10]. Penelitian empiris oleh [11] menunjukkan bahwa peningkatan emisi karbon memiliki hubungan positif dan signifikan terhadap kenaikan suhu rata-rata, yang menjadi indikator utama perubahan iklim.

2.4. Regresi Linear

Regresi linier merupakan metode analisis statistik yang digunakan untuk mengetahui hubungan antara variabel independen dan variabel dependen berdasarkan hubungan linier[12]. Metode ini banyak digunakan dalam penelitian kuantitatif karena mampu menjelaskan arah dan besarnya pengaruh suatu variabel terhadap variabel lainnya secara matematis dan mudah diinterpretasikan. Model regresi linier secara umum dirumuskan sebagai berikut:

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon$$

di mana Y adalah variabel dependen, X adalah variabel independen, α adalah konstanta, dan β adalah koefisien regresi.

2.5. Penelitian Terdahulu

Penelitian yang dilakukan oleh Malihah membahas tantangan dalam mengatasi dampak perubahan iklim dan mendukung pembangunan ekonomi berkelanjutan. Kajian tersebut mengulas berbagai upaya mitigasi perubahan iklim yang perlu diselaraskan dengan kebutuhan pembangunan ekonomi, sehingga menjadi landasan penting dalam memahami kompleksitas hubungan antara aktivitas manusia dan kondisi iklim global [1].

Daeli dalam penelitiannya mengkaji strategi pengurangan emisi gas rumah kaca sebagai upaya mengatasi konflik global akibat perubahan iklim. Penelitian tersebut menekankan bahwa strategi mitigasi emisi karbon harus bersifat komprehensif dan lintas sektor guna mencegah dampak perubahan iklim yang lebih besar di masa mendatang [2].

Putra dan Andryana membandingkan kinerja algoritma ARIMA dan LSTM dalam peramalan tingkat konsentrasi CO₂ atmosfer untuk masa mendatang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan deep learning seperti LSTM mampu menangkap pola non-linear pada data emisi karbon, yang menjadi pembanding penting bagi metode regresi linier yang digunakan dalam penelitian ini [3].

Adi melakukan analisis pengaruh aktivitas ekonomi terhadap peningkatan emisi karbon melalui studi empiris di empat negara ASEAN, termasuk Indonesia. Penelitian tersebut membuktikan bahwa pertumbuhan ekonomi dan konsumsi energi memiliki pengaruh positif terhadap peningkatan emisi karbon, yang relevan sebagai konteks regional bagi penelitian ini [4].

Su melakukan analisis sederhana terhadap emisi CO₂ dunia serta hubungannya dengan perubahan suhu global. Penelitian ini menggunakan model regresi statistik dan menemukan bahwa terdapat korelasi linear positif antara peningkatan emisi CO₂ dan

perubahan suhu rata-rata global, sehingga mendukung penggunaan metode regresi linier dalam analisis perubahan iklim [5].

Dhika dan Adiastuti melakukan prediksi emisi karbon di Asia Tenggara menggunakan machine learning dan menganalisis implikasinya terhadap perubahan iklim serta kebijakan mitigasi. Penelitian tersebut menggunakan algoritma machine learning dan menghasilkan model prediksi dengan akurasi tinggi, yang menjadi acuan perbandingan metode dalam penelitian ini [6].

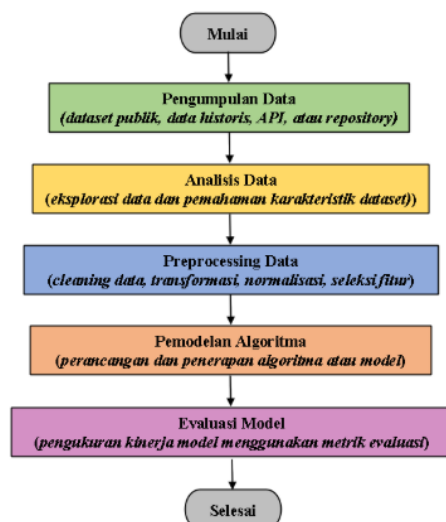
Lismiyah meneliti kausalitas antara konsumsi energi dan emisi karbon di Indonesia. Penelitian ini memperkuat argumen bahwa konsumsi energi fosil merupakan pendorong utama peningkatan emisi karbon di Indonesia dan memberikan dasar empiris yang kuat bagi penelitian yang berfokus pada hubungan emisi karbon dengan perubahan iklim [11].

Zahwa dan Nurdin menganalisis pengaruh indikator perubahan iklim terhadap kondisi lingkungan di Lamatti Rilau menggunakan model regresi linier berganda. Penelitian tersebut membuktikan bahwa model regresi linier dapat diterapkan secara efektif untuk menganalisis hubungan antarvariabel perubahan iklim, yang memperkuat pendekatan metodologis yang digunakan dalam penelitian ini [14].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode regresi linier sederhana. Data yang digunakan merupakan data sekunder berupa data tahunan emisi karbon dan indikator perubahan iklim di Dunia selama periode 2019–2024 yang diperoleh dari sumber resmi dan terpercaya.

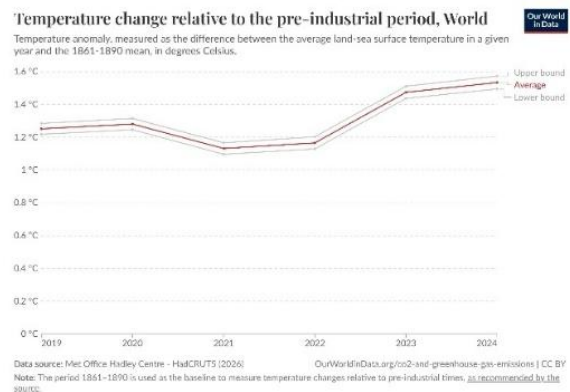
Tahapan penelitian meliputi pengumpulan data, studi literatur, preprocessing data, pemodelan regresi linier, serta evaluasi model menggunakan metrik koefisien determinasi (R^2), Mean Squared Error (MSE), dan Mean Absolute Error (MAE).



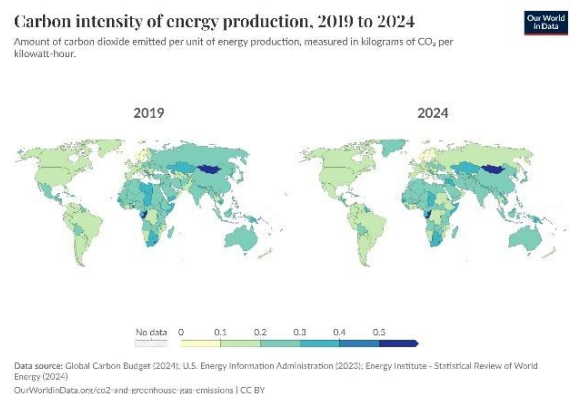
Gambar 1. Flowchart Penelitian

3.1. Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan tahap awal dalam penelitian yang bertujuan untuk memperoleh data yang relevan dan mendukung analisis. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder, yaitu data yang diperoleh dari sumber yang telah tersedia dan dipublikasikan secara resmi [13]. Penggunaan data sekunder dipilih karena data tersebut telah melalui proses validasi dan banyak digunakan dalam penelitian ilmiah.



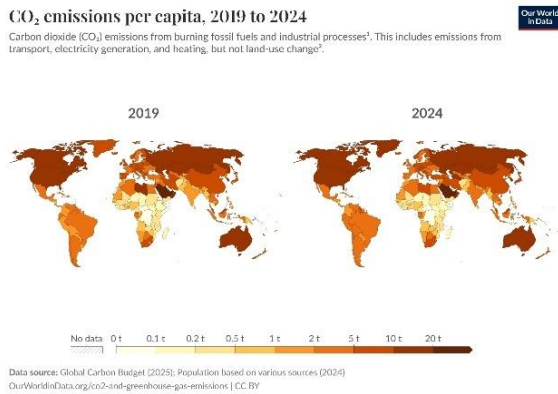
Gambar 2. Grafik Temperature Anomaly



Gambar 3. Carbon Intensity Of Energy Production

Data intensitas karbon dari produksi energi yang mengukur jumlah CO_2 yang dihasilkan per kilowatt-jam (kWh) energi yang diproduksi di suatu negara. Data ini divisualisasikan dalam peta tematik (Gambar Carbon Intensity of Energy Production) yang mencerminkan seberapa “bersih” atau “kotor” sumber energi yang digunakan suatu negara, dengan skala dari 0 hingga $>0,5 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$.

Data emisi karbon per kapita dari berbagai negara selama periode 2019–2024, yang menggambarkan rata-rata emisi CO_2 per orang dari aktivitas pembakaran bahan bakar fosil dan proses industri. Data ini divisualisasikan dalam peta tematik (Gambar CO_2 Emissions Per Capita) yang menunjukkan variasi emisi antarnegara, dari kategori rendah ($<2 \text{ ton/orang}$) hingga sangat tinggi ($>20 \text{ ton/orang}$).



Gambar 4. Emissions Per-Capita

Data yang dikumpulkan berupa:

- Data tahunan emisi karbon dunia
- Data indikator perubahan iklim yang direpresentasikan oleh suhu rata-rata tahunan

Periode data yang digunakan adalah tahun 2019–2024, dengan pertimbangan ketersediaan data yang konsisten dan berkelanjutan.

3.2. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperkuat landasan teori dan kerangka konseptual penelitian. Literatur yang digunakan berasal dari jurnal ilmiah, buku referensi, serta laporan resmi yang membahas topik emisi karbon, perubahan iklim, dan metode regresi linier.

Studi literatur mencakup:

- Konsep dan sumber emisi karbon
- Dampak emisi karbon terhadap perubahan iklim
- Indikator perubahan iklim, khususnya suhu rata-rata
- Penerapan metode regresi linier dalam penelitian lingkungan

Hasil studi literatur digunakan sebagai dasar dalam menentukan variabel penelitian dan metode analisis yang digunakan.

3.3. Sumber Data

Data sekunder dalam penelitian ini diperoleh dari beberapa sumber resmi dan terpercaya, antara lain:

- World Bank
- Our World in Data

Sumber-sumber tersebut dipilih karena menyediakan data yang terbuka, konsisten, dan sering digunakan dalam penelitian akademik terkait lingkungan dan ekonomi.

3.4. Preprocessing data

Preprocessing data dilakukan untuk memastikan bahwa data yang digunakan dalam pemodelan memiliki kualitas yang baik dan layak dianalisis. Tahapan preprocessing data dalam penelitian ini meliputi:

- Pemeriksaan kelengkapan data (*missing values*)
- Penanganan data yang tidak lengkap
- Identifikasi dan penanganan *outlier*

- Penyesuaian satuan dan skala data
- Penyusunan data berdasarkan urutan waktu (*time series*)

Tahap preprocessing ini penting untuk menghindari kesalahan analisis dan meningkatkan akurasi hasil pemodelan regresi linier.

3.5. Pemodelan Regresi Linear

Pemodelan dilakukan menggunakan **regresi linier berganda** untuk mengetahui hubungan dan pengaruh emisi karbon terhadap perubahan iklim di Indonesia. Model regresi linier yang digunakan dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut [14]:

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon$$

dengan:

Y = perubahan iklim (suhu rata-rata)

X = emisi karbon

α = konstanta

b = koefisien regresi

ϵ = *error term*

Koefisien regresi b menunjukkan arah dan besarnya pengaruh emisi karbon terhadap perubahan iklim. Jika nilai b bernilai positif, maka peningkatan emisi karbon akan diikuti oleh peningkatan suhu rata-rata.

3.6. Evaluasi Model

Evaluasi model dilakukan untuk menilai kinerja dan tingkat keakuratan model regresi linier yang dibangun. Evaluasi dilakukan menggunakan beberapa metrik regresi, yaitu:

- Koefisien Determinasi (R^2), untuk mengukur kemampuan emisi karbon dalam menjelaskan variasi perubahan iklim. Untuk rumus (R^2) sebagai berikut:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}$$

- Mean Squared Error (MSE), untuk mengukur rata-rata kuadrat kesalahan prediksi [15]. Untuk rumus MSE sebagai berikut:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

- Mean Absolute Error (MAE), untuk mengukur rata-rata selisih absolut antara nilai aktual dan nilai prediksi [16]. Untuk rumus MAE sebagai berikut:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

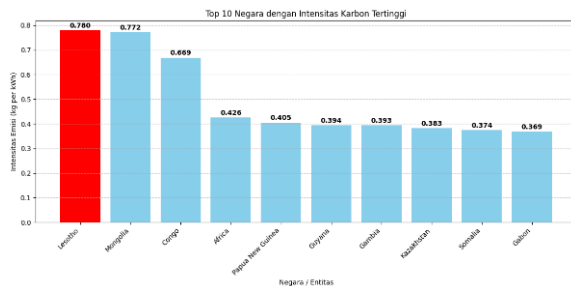
Hasil evaluasi ini digunakan untuk menentukan apakah model regresi linier yang dibangun sudah cukup baik dalam menjelaskan hubungan antarvariabel.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Eksplorasi Data (EDA)

Berdasarkan analisis deskriptif terhadap data emisi dunia periode 2019–2024, diperoleh rata-rata intensitas emisi karbon sebesar 0,2221 kg/kWh. Selain itu, dilakukan identifikasi terhadap entitas dengan intensitas emisi tertinggi di seluruh dunia. Ditemukan bahwa Lesotho memiliki nilai intensitas tertinggi mencapai 0,7797 kg/kWh pada tahun 2021. Hal ini menunjukkan adanya ketimpangan efisiensi energi

yang signifikan antar negara, di mana negara dengan ketergantungan energi fosil yang tinggi cenderung memiliki angka intensitas karbon yang jauh di atas rata-rata dunia.



Gambar 5. Grafik Batang (Top 10 Negara Tertinggi)

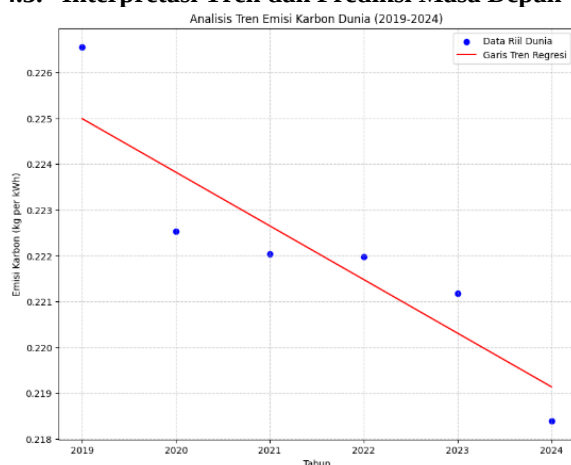
4.2. Evaluasi Performa Model Regresi Linier

Tabel 1. Evaluasi (R², MSE, MAE)

index	Metrik	Nilai	Interpretasi
0	R-Squared (R ²)	0.8256	Akurasi tren (1.00 = Sempurna)
1	Mean Squared Error (MSE)	0.0000	Rata-rata kuadrat kesalahan
2	Mean Absolute Error (MAE)	0.0009	Rata-rata selisih prediksi (kg/kWh)

Model regresi linier dilatih menggunakan seluruh populasi data dunia untuk menangkap tren tahunan secara akurat. Performa model diukur menggunakan tiga metrik utama yang disajikan pada Tabel 1. Hasil evaluasi menunjukkan nilai Koefisien Determinasi (R²) sebesar 0,8256, yang berarti variabel waktu (tahun) mampu menjelaskan 82,56% perubahan nilai emisi karbon dunia. Nilai Mean Absolute Error (MAE) yang sangat rendah (0,0009) menunjukkan bahwa prediksi model memiliki selisih rata-rata yang sangat kecil terhadap data riil, sehingga model ini valid untuk digunakan sebagai alat prediksi tren.

4.3. Interpretasi Tren dan Prediksi Masa Depan



Gambar 6. Analisis Tren Emisi Karbon Dunia (2019-2024)

Hasil analisis korelasi menunjukkan hubungan negatif yang sangat kuat antara tahun dan emisi dunia dengan nilai -0,9124. Hal ini membuktikan bahwa secara global, intensitas emisi karbon per unit energi terus mengalami penurunan setiap tahunnya. Persamaan regresi yang dihasilkan adalah $Y = 2,5902 - 0,00117X$, yang berarti setiap pertambahan satu tahun, intensitas karbon dunia diprediksi turun sebesar 0,00117 kg/kWh. Berdasarkan model ini, diprediksi pada tahun 2030 intensitas karbon dunia akan menurun hingga menyentuh angka 0,2121 kg/kWh.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi hubungan negatif yang lemah antara variabel waktu (tahun) dan emisi karbon per unit energi, seperti yang ditunjukkan oleh persamaan regresi linear ($Y = 6.511 - 0.0031X$). Koefisien regresi (b) sebesar -0.0031 mengindikasikan adanya tren penurunan emisi karbon per unit energi seiring berjalannya waktu, meskipun laju penurunannya sangat kecil. Hasil evaluasi model menunjukkan bahwa model ini memiliki kemampuan prediksi yang sangat terbatas, dengan nilai Koefisien Determinasi (R²) sebesar 0.0042. Ini berarti hanya sekitar 0.42% variasi dalam emisi karbon yang dapat dijelaskan oleh perubahan tahun, sementara 99.58% variasi lainnya dipengaruhi oleh faktor-faktor lain di luar model. Nilai Mean Squared Error (MSE) sebesar 0.0058 dan Mean Absolute Error (MAE) sebesar 0.0503 menunjukkan tingkat kesalahan prediksi yang rendah secara absolut, namun hal ini lebih mencerminkan skala data yang kecil daripada akurasi model yang tinggi.

Temuan ini, ditambah dengan bukti peningkatan suhu anomali global yang konsisten dari 1.35°C (2019) menjadi 1.39°C (2024), mengarah pada kesimpulan ganda. Di satu sisi, terdapat sinyal positif yang sangat halus berupa penurunan intensitas karbon dari produksi energi global. Di sisi lain, sinyal ini terlalu lemah dan tidak cukup untuk mencegah pemanasan global yang terus berlanjut. Disparitas antara tren emisi yang hampir statis dan kenaikan suhu yang jelas memperkuat argumen bahwa dinamika sistem iklim sangat kompleks dan tidak dapat direduksi menjadi hubungan linear sederhana antara dua variabel. Variasi spasial yang besar dalam emisi per kapita dan intensitas karbon antar negara seperti yang divisualisasikan dalam peta menunjukkan bahwa faktor-faktor lokal, kebijakan nasional, dan struktur ekonomi memegang peran yang jauh lebih penting dalam menentukan jejak karbon suatu negara dibandingkan dengan sekadar kemajuan waktu.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan model dengan menambahkan variabel-variabel yang lebih relevan dalam menjelaskan emisi karbon dan perubahan iklim, seperti penggunaan energi terbarukan, intensitas energi terhadap Produk Domestik Bruto (PDB), tingkat urbanisasi, investasi teknologi ramah lingkungan, serta kebijakan pengendalian emisi yang

diterapkan oleh masing-masing negara. Penambahan variabel tersebut diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai faktor-faktor yang memengaruhi emisi karbon dan dampaknya terhadap perubahan iklim. Selain itu, penelitian mendatang dapat mengembangkan model dengan menjadikan suhu anomali atau indikator perubahan iklim lainnya sebagai variabel dependen, sementara berbagai indikator emisi karbon dan faktor sosial-ekonomi digunakan sebagai variabel independen sehingga hubungan sebab-akibat yang terjadi dapat dianalisis secara lebih mendalam.

Dari sisi metodologi, penggunaan regresi linier sederhana dapat ditingkatkan melalui penerapan regresi multivariat, analisis data panel, maupun algoritma machine learning seperti Random Forest dan Gradient Boosting yang mampu menangkap hubungan nonlinier antarvariabel. Mengingat adanya perbedaan karakteristik ekonomi, energi, dan tingkat emisi antarnegara, penelitian selanjutnya juga disarankan menggunakan pendekatan komparatif dengan mengelompokkan negara berdasarkan karakteristik tertentu agar diperoleh hasil yang lebih spesifik dan representatif. Selain itu, penggunaan data dengan rentang waktu yang lebih panjang serta penerapan validasi model menggunakan data di luar sampel (*out-of-sample*) perlu dilakukan untuk meningkatkan akurasi dan keandalan hasil prediksi sehingga dapat memberikan dasar yang lebih kuat bagi perumusan kebijakan mitigasi perubahan iklim.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Malihah, P. Global, and E. Berkelanjutan, "Tantangan Dalam Upaya Mengatasi Dampak Perubahan Iklim Dan Mendukung Pembangunan Ekonomi Berkelanjutan : Sebuah Tinjauan Challenges In Overcoming The Impact Of Climate Change And Supporting Sustainable Economic Development : A Review," vol. 17, pp. 219–232, 2022, doi: 10.47441/jkp.v17i2.272.
- [2] I. S. Daeli, "EnvironC Strategi mengurangi emisi gas rumah kaca untuk mengatasi konflik global akibat perubahan iklim," vol. 1, no. 2, pp. 72–82, 2024.
- [3] M. A. Putra, S. Andryana, S. Informasi, U. Nasional, J. Sawo, and M. Jakarta, "Perbandingan Algoritma Arima Dan Lstm Dalam Peramalan Tingkat Konsentrasi Co2 Emisi Atmosfer Untuk Masa Mendatang," vol. 9, no. 3, pp. 4150–4157, 2025.
- [4] M. Adi, "Analisis Pengaruh Aktivitas Ekonomi terhadap Peningkatan Emisi Karbon : Studi Empiris Empat Negara ASEAN," vol. 12, no. 2, pp. 187–202, 2023.
- [5] Z. Su, "World CO2 Emissions : Simple Analysis and its Relationship with Global Temperature Change," vol. 25, pp. 21–36, 2022.
- [6] M. R. Dhika and H. J. Adiasuti, "Prediksi Emisi Karbon di Asia Tenggara Menggunakan Machine Learning : Implikasi Terhadap Perubahan Iklim dan Kebijakan Mitigasi," pp. 20–33, 2025.
- [7] J. I. Daerah, V. I. I. No, A. F. Y. Mempengaruhi, E. Karbondioksida, D. I. Negara, and I. B. Tahun, "Jurnal Jendela Inovasi Daerah," vol. 10, pp. 30–52, 2024.
- [8] A. Saputri and D. A. Suseno, "Faktor yang Berpengaruh terhadap Emisi Karbon dalam Kerangka Pembangunan Berkelanjutan : Analisis Empiris di Indonesia Fakultas Ekonomika dan Bisnis , Universitas Negeri Semarang abad ke-21 , mengancam keberlanjutan ekologis dan stabilitas sosial ekonomi di karbon telah mencapai tingkat tertinggi sepanjang sejarah manusia modern , PDB per kapita dan emisi CO₂ per kapita Indonesia menunjukkan tren yang meningkat . Pola ini sesuai dengan fase awal Environmental Kuznets Curve (EKC), yaitu scale effect di mana peningkatan aktivitas ekonomi mendorong konsumsi energi fosil dan industrialisasi sehingga menambah emisi karbon . Sumber : Our World in Data dan World Bank , 2023 Namun , terdapat gap pada tahun-tahun tertentu seperti , 1994 – 1995 dan terjadi perbaikan teknologi industri dan krisis keuangan global . Pada 2013 – 2014 dan," vol. 6, no. 8, pp. 3182–3203, 2025.
- [9] M. F. Irma, E. Gusmira, S. Teknologi, U. I. N. Sultan, and T. Saifuddin, "Peningkatan Emisi Gas Rumah Kaca Di Indonesia High Temperature Rise Due To Increased Greenhouse Gas," vol. II, pp. 26–32, 2024.
- [10] U. Jember, "Mekanisme Efek Globalwarming Oleh Gas Rumah," vol. 8, no. 6, pp. 121–126, 2024.
- [11] E. Lismiyah, A. R. Taher, T. Gunarto, and N. Aida, "The Causality Between Energy Consumption and Carbon Emission in Indonesia," 2024.
- [12] M. S. Madany *et al.*, "Penerapan Regresi Linier Sederhana dalam Peramalan Nilai Ekspor dan Impor di Provinsi Jawa Tengah Institut Teknologi Statistika dan Bisnis Muhammadiyah Semarang , Indonesia Provinsi Jawa Tengah merupakan salah satu provinsi di Indonesia yang memiliki," vol. 10, no. 1, 2022.
- [13] L. A. Sekarini and I. Setiadi, "Ukuran Perusahaan Dan Kinerja," vol. 19, no. 2, pp. 203–212, 2021.
- [14] N. A. Zahwa and F. Nurdin, "Pengaruh Indikator Perubahan Iklim Terhadap Lamatti Rilau," vol. 3, no. 3, pp. 124–134, 2025.
- [15] B. Al Qohar, A. U. Dullah, and P. Utami, "Vehicle CO₂ Emission Predictive Analytics Using HistGradientBoosting Regression Algorithms," vol. 2, no. 1, pp. 1–12, 2025.
- [16] P. Studi *et al.*, "Prediksi Emisi Co2 Di Indonesia Menggunakan Pendekatan Hybrid Arima Dan LSTM," vol. 16, no. 02, pp. 95–108, 2025.