

Analisis Komparatif Model Eksponensial, Logistik, dan *Holt-Winters Exponential Smoothing* dalam Prediksi Emisi CO₂ di Indonesia Tahun 2030

Amanda Putri Aprilliani (105222001)¹, Muhammad Sholihin Wiwi (105222012)²

^{1,2}Ilmu Komputer, Fakultas Sains dan Ilmu Komputer, Universitas Pertamina Jakarta, Indonesia

Abstrak

Peningkatan emisi CO₂ menjadi salah satu tantangan global terbesar, dengan Indonesia sebagai negara yang mengalami pertumbuhan emisi signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan membandingkan tiga model matematis dalam memprediksi emisi CO₂ Indonesia pada tahun 2030: Model Eksponensial, Model Logistik, dan Model Holt-Winters Exponential Smoothing (HWES). Menggunakan data historis emisi CO₂ dari tahun 1889 hingga 2023, penelitian ini melakukan analisis komparatif dengan metrik evaluasi Mean Squared Error (MSE) dan Root Mean Square Error (RMSE).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa masing-masing model memiliki karakteristik prediksi yang berbeda. Model eksponensial memberikan prediksi emisi CO₂ tertinggi sebesar 1.050,0 juta ton dengan RMSE 19,7 juta ton, mencerminkan pertumbuhan tanpa batas. Model logistik menghasilkan prediksi paling konservatif sebesar 841,9 juta ton dengan RMSE terendah 14,9 juta ton, mempertimbangkan batas maksimum aspek lingkungan. Model Holt-Winters menghasilkan prediksi menengah 891,3 juta ton dengan RMSE 15,3 juta ton, mampu menangkap fluktuasi musiman. Model logistik dianggap paling akurat karena mempertimbangkan *carrying capacity* dan memiliki tingkat kesalahan prediksi paling rendah. Penelitian ini memberikan wawasan penting dalam pengembangan strategi mitigasi perubahan iklim di Indonesia sebagaimana emisi CO₂ adalah penyumbang terbesar meningkatnya suhu bumi.

Kata Kunci: Emisi CO₂; Model Prediksi; Eksponensial; Logistik; Holt-Winters; Perubahan Iklim

1. Latar Belakang

Perubahan iklim global menjadi salah satu tantangan terbesar yang dihadapi oleh hampir seluruh negara di dunia saat ini, dengan emisi CO₂ sebagai kontributor utama. Data [1] menunjukkan

bahwa kandungan CO₂ di atmosfer telah meningkat secara signifikan sejak tahun 1970, dari sekitar 300 parts per million (ppm) menjadi lebih dari 410 ppm pada tahun 2023. Indonesia, sebagai negara dengan populasi terbesar keempat di dunia, memiliki data historis yang menunjukkan tren yang mengkhawatirkan dalam peningkatan emisi CO₂. Berdasarkan [2], emisi karbon Indonesia telah mengalami peningkatan signifikan dari sekitar 11,8 juta ton CO₂ pada tahun 1925, menjadi lebih dari 730 juta ton CO₂ pada tahun 2023. Emisi karbon di Indonesia didominasi oleh tiga sektor utama yaitu sektor energi yang menyumbang sekitar 46%, sektor transportasi dengan kontribusi 26%, dan manufaktur konstruksi menyumbang hampir 17% dari total emisi [3]. Kondisi ini memerlukan perhatian khusus mengingat karakteristik geografis Indonesia sebagai negara kepulauan yang rentan terhadap dampak perubahan iklim. Kondisi ini memerlukan perhatian khusus mengingat karakteristik geografis Indonesia sebagai negara kepulauan yang rentan terhadap dampak perubahan iklim.

Kerentanan Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia tercermin dari berbagai dampak serius peningkatan emisi CO₂ yang mempengaruhi berbagai sektor vital. Dalam aspek kebencanaan, Data BNPB mencatat lebih dari 3.000 kejadian bencana hidrometeorologi pada tahun 2022 dengan kerugian ekonomi mencapai triliunan rupiah [4]. Ancaman serius juga terjadi di wilayah pesisir, dimana Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) memproyeksikan potensi kehilangan 115 pulau hingga tahun 2100 akibat kenaikan permukaan laut [5]. [6] Menyatakan bahwa pada tahun 2050 diprediksi akan terjadi penurunan sebesar 20-25% untuk produktivitas padi akibat peningkatan emisi CO₂ di Indonesia. Sementara di sektor kelautan, asidifikasi laut akibat penyerapan CO₂ telah mengakibatkan pemutihan pada sekitar 30% terumbu karang Indonesia, mengancam mata pencaharian nelayan dan pariwisata bahari [7]. Rangkaian dampak yang masif ini menunjukkan urgensi untuk mengembangkan model prediksi emisi karbon yang akurat sebagai landasan pengambilan kebijakan mitigasi yang efektif.

Menghadapi tantangan ini, pengembangan model prediksi yang akurat menjadi langkah krusial dalam mendukung pengambilan kebijakan pengendalian emisi di Indonesia. Penggunaan model matematika menawarkan pendekatan sistematis dan terukur untuk memahami pola historis dan memproyeksikan tren masa depan. Dalam konteks penelitian ini, peneliti mengkaji tiga pendekatan pemodelan matematis untuk tahun 2030 dengan Model Eksponensial, Model Logistik, dan Model Holt-Winters Exponential Smoothing (HWES). Melalui analisis komparatif yang menggunakan metrik MSE (Mean Squared Error) dan RMSE (Root Mean Square Error), studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi model yang paling akurat dalam menangani karakteristik data *time series* emisi karbon Indonesia. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan landasan ilmiah yang kuat untuk pengembangan strategi pengurangan emisi yang lebih efektif dan penetapan target yang lebih realistis, sejalan dengan komitmen Indonesia dalam program *Sustainable Development Goals* (SDGs) 13 tentang Penanganan Perubahan Iklim.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji penggunaan berbagai model matematis untuk prediksi emisi CO₂. Penelitian [8] melakukan studi komprehensif menggunakan Environmental Logistic Curve untuk menganalisis pola emisi karbon di 175 negara dan mendemonstrasikan kemampuan model logistik dalam mempertimbangkan batas pertumbuhan emisi. Dalam konteks negara Teluk, [9] melakukan analisis komparatif yang menggabungkan model ARIMA, ANN, dan HWES, dimana hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa model HWES memiliki performa yang baik dalam meramalkan fluktuasi emisi karbon di wilayah tersebut. Studi terbaru [10], telah melakukan peramalan emisi CO₂ di Indonesia menggunakan model ETS smoothing, yang meru-

pakan bagian dari model eksponensial, dengan hasil evaluasi yang menunjukkan tingkat akurasi yang menjanjikan (MAPE 7.24%).

Meskipun ketiga penelitian tersebut telah memberikan kontribusi signifikan dalam pemahaman tentang pemodelan emisi karbon, belum ada studi komprehensif yang membandingkan secara sistematis efektivitas model eksponensial, logistik, dan HWES dalam konteks spesifik emisi CO₂ di Indonesia. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan melakukan analisis komparatif untuk mengidentifikasi model yang paling akurat dalam memprediksi emisi CO₂ di Indonesia untuk tahun 2030.

2. Penelitian Terdahulu

2.1. A Comparative Study of CO₂ Emission Forecasting in the Gulf Countries Using Autoregressive Integrated Moving Average, Artificial Neural Network, and Holt-Winters Exponential Smoothing Models

Studi komparatif [9] meneliti tentang peramalan emisi CO₂ di negara-negara Teluk menggunakan tiga model berbeda: Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA), Artificial Neural Network (ANN), dan Holt-Winters Exponential Smoothing (HWES). Penelitian tersebut menggunakan data yang dikumpulkan dari United States Energy Information Administration (EIA) dan menerapkan beberapa variasi model ARIMA seperti ARIMA (1,1,1), ARIMA (1,1,2), dan ARIMA (2,1,2). Hasil analisis komparatif menunjukkan bahwa model ANN memberikan performa yang lebih baik dalam memperkirakan emisi CO₂ di negara-negara Teluk dibandingkan dengan model ARIMA dan HWES. Hasil penelitian ini memberikan wawasan penting tentang keunggulan model ANN dalam menangani kompleksitas data emisi karbon, serta memberikan prediksi terbaik untuk emisi CO₂ di negara-negara Teluk pada tahun 2025.

2.2. Growing green? Forecasting CO₂ emissions with Environmental Kuznets Curves and Logistic Growth Models

[8] mengkaji penggunaan Environmental Kuznets Curve (EKC) dan Environmental Logistic Curve (ELC) untuk meramalkan emisi karbon di 175 negara. Studi ini berangkat dari latar belakang meningkatnya emisi CO₂ global yang mencapai 32,3 miliar metrik ton pada tahun 2011, atau naik 48,9% dibandingkan level tahun 1990. Model EKC yang digunakan dalam penelitian ini adalah polinomial derajat tiga yang mempertimbangkan hubungan antara tingkat pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan, sementara model ELC mengasumsikan pertumbuhan eksponensial pada tahap awal yang kemudian melambat hingga mencapai titik saturasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa model EKC, memberikan performa terbaik pada 44,4% negara sampel, sementara model logistik unggul di 24,1% negara sampel, dan kedua model menunjukkan hasil yang setara di 17,6% negara lainnya. Studi ini memberikan wawasan penting tentang kemampuan kedua model dalam meramalkan tren emisi karbon dan hubungannya dengan pembangunan ekonomi.

2.3. CO₂ Emission Forecasting in Indonesia Until 2030: Evaluation of ETS Smoothing Prediction Models and Their Implications for Global Climate Change Mitigation

Studi yang dilakukan pada [10] memprediksi emisi CO₂ di Indonesia hingga tahun 2030 menggunakan model Error-Trend-Seasonal (ETS) smoothing. Penelitian ini menggunakan data emisi CO₂ Indonesia dari tahun 1960 hingga 2019 yang diperoleh dari platform Kaggle, dengan sumber data utama berasal dari United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) dan International Energy Agency (IEA). Metode ETS smoothing dipilih karena kemampuannya untuk menangkap tiga komponen penting dalam data *time series* yaitu error, tren, dan musiman. Hasil evaluasi model menunjukkan performa yang cukup baik dengan nilai Mean Absolute Error (MAE) sebesar 146.154,39 ton, Mean Squared Error (MSE) sebesar 21.838.251.772,37, Root Mean Square Error (RMSE) sebesar 147.777,71, dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) sebesar 7.24%. Proyeksi yang dihasilkan menunjukkan bahwa emisi CO₂ Indonesia berpotensi mencapai lebih dari 1 miliar ton pada tahun 2030, meskipun hasil prediksi menunjukkan adanya sedikit penurunan di tahun-tahun mendatang.

3. Metode dan Materi Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan mengidentifikasi permasalahan yang muncul, yaitu peningkatan emisi CO₂ di Indonesia di beberapa dekade terakhir. Permasalahan ini memunculkan kebutuhan akan model prediksi yang dapat memberikan gambaran tentang tren emisi di masa depan. Studi literatur dari beberapa referensi terkait seperti [9], [10], [8], dilakukan untuk memahami model-model prediksi yang dapat diterapkan pada data *time series* emisi CO₂.

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder emisi CO₂ tahunan di Indonesia dari tahun 1889-2023 yang diperoleh dari [2]. Data tersebut mencakup informasi entitas, kode negara, tahun, dan emisi CO₂ dalam satuan ton.

Dalam penelitian ini, tiga model matematis digunakan untuk menganalisis dan memprediksi emisi CO₂ di Indonesia pada tahun 2030 yaitu Model Eksponensial, Model Logistik, dan Model Holt-Winters Exponential Smoothing. Implementasi ketiga model tersebut dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan memanfaatkan library seperti pandas untuk pengolahan data, scipy untuk perhitungan numerik, dan statsmodels untuk implementasi model HWES.

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi dengan data aktual menggunakan metrik error MSE (Mean Squared Error) dan RMSE (Root Mean Squared Error). Analisis komparatif ketiga model tersebut akan dibahas secara rinci pada bagian berikutnya.

3.1. Model Eksponensial

Model eksponensial merupakan model pertumbuhan yang mengasumsikan pertumbuhan tanpa batas dengan laju pertumbuhan konstan. Dalam konteks emisi CO₂, model ini menggambarkan peningkatan emisi yang terus-menerus sejalan dengan pertumbuhan aktivitas manusia dan industrialisasi tanpa mempertimbangkan faktor pembatas seperti regulasi lingkungan atau kapasitas maksimum.

Misalkan $E(t)$ menyatakan jumlah emisi CO₂ pada waktu t , dengan E_0 adalah jumlah emisi pada waktu awal $t = 0$, dan b adalah laju pertumbuhan emisi. Model eksponensial dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial:

$$\frac{dE(t)}{dt} = bE(t) \quad (1)$$

Sehingga, persamaan model yang digunakan dalam implementasi prediksi emisi CO₂ ini adalah:

$$E(t) = E_0 e^{b(t-t_0)} \quad (2)$$

Parameter	Keterangan
$E(t)$	Jumlah emisi CO ₂ pada waktu t (dalam juta ton)
E_0	Jumlah emisi CO ₂ awal (dalam juta ton)
b	Laju pertumbuhan emisi CO ₂ (per tahun)
t	Waktu (dalam tahun)
t_0	Waktu awal pengamatan (tahun 1889)

3.1.1. Fitting Data

Proses fitting data untuk model eksponensial dilakukan menggunakan fungsi `curve_fit` dari library `scipy.optimize`. Dalam implementasinya, proses fitting melibatkan beberapa tahap:

1. Persiapan Data Data emisi CO₂ dilakukan scaling dengan membagi nilai emisi dengan 1.000.000 untuk mengkonversi satuan dari ton menjadi juta ton. Hal ini penting untuk meningkatkan stabilitas numerik dalam perhitungan.

2. Inisialisasi Parameter Awal Untuk memulai proses optimasi, kita memberikan nilai awal (initial guess) untuk parameter model:

- $E_0 = 1$ juta ton, sebagai estimasi awal emisi CO₂
- $b = 0,01$ per tahun, mengasumsikan pertumbuhan moderat sekitar 1% per tahun

3. Proses Optimasi Fungsi `curve_fit` menggunakan metode least squares untuk menemukan parameter optimal yang meminimalkan jumlah kuadrat error antara data aktual dan prediksi model. Proses fitting menghasilkan nilai parameter optimal:

- $E_0 = 1,574075$ juta ton, yang merepresentasikan estimasi emisi awal
- $b = 0,046120$ per tahun, yang mengindikasikan tingkat pertumbuhan emisi tahunan sebesar 4,61%

3.2. Model Logistik

Model logistik merupakan model pertumbuhan yang mempertimbangkan adanya batas maksimum (*carrying capacity*). Dalam konteks emisi CO₂, model ini menggambarkan peningkatan emisi

yang pada akhirnya akan mencapai suatu batas maksimum, mencerminkan adanya faktor pembatas seperti regulasi lingkungan, kapasitas industri, atau pembatasan penggunaan bahan bakar fosil. Misalkan $E(t)$ menyatakan jumlah emisi CO_2 pada waktu t , dengan E_0 adalah jumlah emisi pada waktu awal $t = 0$, K adalah *carrying capacity* (batas maksimum emisi), dan r adalah laju pertumbuhan emisi. Model logistik dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial:

$$\frac{dE(t)}{dt} = rE(t)\left(1 - \frac{E(t)}{K}\right) \quad (3)$$

Sehingga, persamaan model yang digunakan dalam implementasi prediksi emisi CO_2 ini adalah:

$$E(t) = \frac{K}{e^{-r(t-t_0)}\left(\frac{K}{E_0-1}\right) + 1} \quad (4)$$

Parameter	Keterangan
$E(t)$	Jumlah emisi CO_2 pada waktu t (dalam juta ton)
E_0	Jumlah emisi CO_2 awal (dalam juta ton)
K	<i>carrying capacity</i> atau batas maksimum emisi (dalam juta ton)
r	Laju pertumbuhan emisi CO_2 (per tahun)
t	Waktu (dalam tahun)
t_0	Waktu awal pengamatan (tahun 1889)

3.2.1. Fitting Data

Proses fitting data untuk model logistik dilakukan menggunakan fungsi `curve_fit` dari library `scipy.optimize`. Dalam implementasinya, proses fitting melibatkan beberapa tahap:

1. Persiapan Data Data emisi CO_2 dilakukan scaling dengan membagi nilai emisi dengan 1.000.000 untuk mengkonversi satuan dari ton menjadi juta ton. Hal ini penting untuk meningkatkan stabilitas numerik dalam perhitungan.

2. Inisialisasi Parameter Awal Untuk memulai proses optimasi, kita memberikan nilai awal (initial guess) untuk parameter model:

- $E_0 = 1$ juta ton, sebagai estimasi awal emisi CO_2
- $K = 2 \times$ nilai maksimum data historis, sebagai estimasi *carrying capacity*
- $r = 0,05$ per tahun, sebagai estimasi awal laju pertumbuhan

3. Proses Optimasi Fungsi `curve_fit` menggunakan metode least squares dengan batasan parameter untuk menemukan parameter optimal. Batasan ini memastikan bahwa parameter yang dihasilkan masuk akal secara fisik. Proses fitting menghasilkan nilai parameter optimal:

- $E_0 = 0.285706$ juta ton, yang merepresentasikan estimasi emisi awal
- $K = 1284.213360$ juta ton, yang merepresentasikan batas maksimum emisi
- $r = 0.064214$ per tahun, yang mengindikasikan laju pertumbuhan emisi

3.3. Model Holt-Winters Exponential Smoothing

Model Holt-Winters Exponential Smoothing (HWES) merupakan metode peramalan yang mempertimbangkan tiga komponen utama: level, trend, dan seasonal (musiman). Dalam konteks emisi CO₂, model ini dapat menangkap pola pertumbuhan dasar (level), kecenderungan jangka panjang (trend), dan fluktuasi periodik (seasonal) dalam data emisi. Model HWES menggunakan tiga persamaan pemulusan dengan parameter α , β , dan γ yang masing-masing mengontrol pembaruan level, trend, dan komponen musiman:

$$L_t = \alpha(Y_t - S_{t-s}) + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1})$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1}$$

$$S_t = \gamma(Y_t - L_{t-1} - T_{t-1}) + (1 - \gamma)S_{t-s}$$

dimana prediksi untuk m periode ke depan diberikan oleh:

$$\hat{Y}_{t+m} = (L_t + mT_t)S_{t-s+m} \quad (5)$$

Parameter	Keterangan
L_t	Nilai level pada waktu t
T_t	Nilai trend pada waktu t
S_t	Nilai seasonal pada waktu t
Y_t	Nilai aktual pada waktu t
α	Parameter pemulusan level (0-1)
β	Parameter pemulusan trend (0-1)
γ	Parameter pemulusan seasonal (0-1)
s	Panjang periode seasonal

3.3.1. Fitting Data

Proses fitting data dan prediksi untuk model HWES dilakukan menggunakan fungsi `ExponentialSmoothing` dari library `statsmodels`. Dalam implementasinya, proses fitting melibatkan beberapa tahap:

1. Persiapan Data Data emisi CO₂ dikonversi menjadi format time series dengan indeks waktu tahunan. Scaling data dilakukan dengan membagi nilai emisi dengan 1.000.000 untuk mengkonversi satuan dari ton menjadi juta ton.

2. Konfigurasi Model Model HWES dikonfigurasi dengan spesifikasi berikut:

- Komponen trend bersifat aditif
- Komponen seasonal bersifat aditif
- Periode seasonal adalah 4 tahun
- Metode inisialisasi menggunakan estimasi

3. Proses Optimasi Model melakukan optimasi parameter secara otomatis untuk menemukan nilai optimal dari parameter pemulusan. Proses fitting menghasilkan nilai parameter optimal:

- $\alpha = 0,6$ (parameter level), mengindikasikan bobot yang cukup besar untuk observasi terbaru
- $\beta = 0,1$ (parameter trend), menunjukkan perubahan trend yang relatif stabil
- $\gamma = 0,2$ (parameter seasonal), menandakan pengaruh musiman yang moderat

4. Metrik Error

Untuk mengevaluasi akurasi model dalam memprediksi emisi CO₂, digunakan dua metrik error utama: Mean Squared Error (MSE) dan Root Mean Square Error (RMSE).

4.0.1. Mean Squared Error (MSE)

Mean Squared Error merupakan metrik yang mengukur rata-rata kuadrat selisih antara nilai prediksi dan nilai aktual. MSE lebih sensitif terhadap error yang besar karena proses pengkuadratan. Secara matematis, MSE dapat dinyatakan sebagai:

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2 \quad (6)$$

dimana:

- n adalah jumlah observasi
- y_t adalah nilai aktual emisi CO₂ pada waktu t
- \hat{y}_t adalah nilai prediksi emisi CO₂ pada waktu t

4.0.2. Root Mean Square Error (RMSE)

Root Mean Square Error adalah akar kuadrat dari MSE. RMSE memiliki keunggulan dibandingkan MSE karena memiliki satuan yang sama dengan data asli, sehingga lebih mudah diinterpretasikan. RMSE dapat dihitung dengan formula:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad (7)$$

Kedua metrik ini digunakan untuk membandingkan performa ketiga model (Eksponensial, Logistik, dan HWES) dalam memprediksi emisi CO₂. Semakin kecil nilai MSE dan RMSE, semakin akurat model dalam melakukan prediksi.

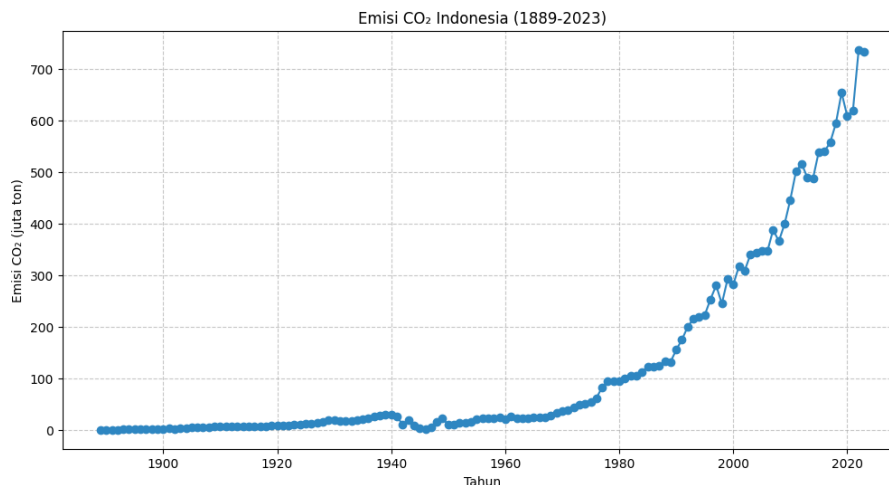


Figure 1. Emisi CO₂ Tahunan di Indonesia

5. Hasil Analisis dan Pembahasan

5.1. Analisis Data Histori Emisi CO₂ di Indonesia

Berdasarkan Figur 1, data historis emisi CO₂ Indonesia dari tahun 1889 hingga 2023 menunjukkan pola pertumbuhan yang sangat menarik yang mencerminkan pertumbuhan pembangunan dan industrialisasi Indonesia.

Pada periode awal (1889-1940), emisi CO₂ Indonesia menunjukkan level yang sangat rendah dan relatif stabil, berkisar di bawah 20 juta ton per tahun. Hal ini mencerminkan kondisi Indonesia yang saat itu masih merupakan wilayah kolonial dengan aktivitas industri yang sangat terbatas. Industrialisasi masih belum berkembang, dan mayoritas aktivitas ekonomi masih berbasis pertanian tradisional.

Memasuki periode 1940-1960, terlihat sedikit fluktuasi dalam data, dengan adanya penurunan tajam di sekitar tahun 1940-an. Penurunan ini kemungkinan terkait dengan periode Perang Dunia II dan masa-masa awal kemerdekaan Indonesia, dimana aktivitas ekonomi mengalami gangguan signifikan.

Titik balik yang sangat jelas terlihat mulai tahun 1970-an, dimana grafik mulai menunjukkan tren kenaikan yang lebih tegas. Periode ini bertepatan dengan era Orde Baru yang menandai dimulainya industrialisasi besar-besaran di Indonesia. Kenaikan emisi CO₂ mulai menunjukkan pola eksponensial, mencerminkan pertumbuhan ekonomi yang pesat dan peningkatan konsumsi energi nasional.

Pertumbuhan paling signifikan terlihat pada periode 2000-2023, dimana emisi CO₂ meningkat sangat tajam dari sekitar 300 juta ton menjadi lebih dari 600 juta ton per tahun. Peningkatan drastis ini sejalan dengan periode pertumbuhan ekonomi Indonesia yang pesat, urbanisasi yang meningkat, pertumbuhan sektor transportasi, dan ekspansi industri manufaktur. Terlihat beberapa fluktuasi kecil dalam periode ini, yang mungkin mencerminkan dampak dari berbagai krisis ekonomi atau implementasi kebijakan lingkungan.

5.2. Hasil dan Analisis Model Eksponensial

Model eksponensial yang digunakan untuk prediksi emisi CO₂ Indonesia menghasilkan parameter optimal dari proses fitting sebagai berikut:

- $E_0 = 1,574075$ juta ton, yang merepresentasikan estimasi emisi awal
- $b = 0,046120$ per tahun, yang mengindikasikan tingkat pertumbuhan emisi tahunan sebesar 4,61%

Interpretasi parameter ini menunjukkan bahwa model memperkirakan tingkat pertumbuhan emisi yang cukup signifikan, dengan peningkatan sekitar 4,61% setiap tahunnya. Nilai E_0 mencerminkan kondisi emisi pada tahap awal pengamatan, yang relatif rendah dibandingkan dengan kondisi saat ini.

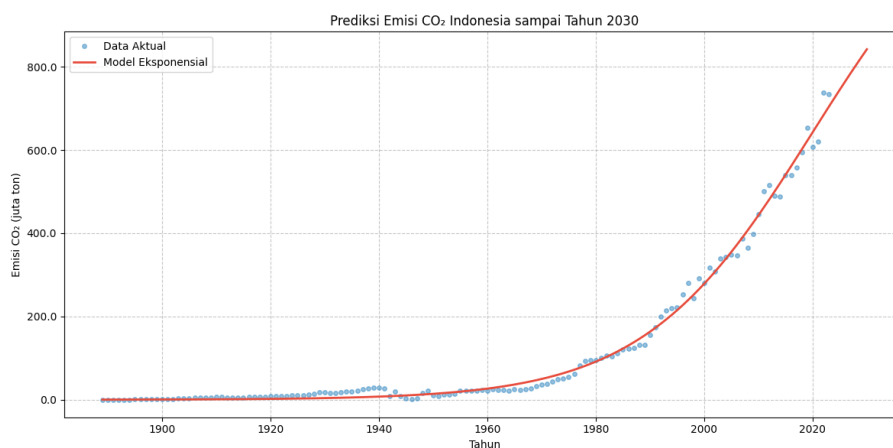


Figure 2. Perbandingan Data Aktual dan Hasil Prediksi Model Eksponensial

Model eksponensial menunjukkan kemampuan yang cukup baik dalam menangkap tren pertumbuhan emisi CO₂ Indonesia, terutama dalam beberapa aspek penting.

Model berhasil menangkap karakteristik pertumbuhan eksponensial yang terlihat jelas dalam data, khususnya setelah tahun 1970. Kurva prediksi (garis merah) mengikuti pola pertumbuhan data aktual (titik biru) dengan cukup akurat, menunjukkan bahwa asumsi pertumbuhan eksponensial sesuai dengan pola historis emisi CO₂ Indonesia.

Pada periode awal (1889-1960), model mampu merepresentasikan fase pertumbuhan lambat dengan baik, dimana kurva prediksi hampir berimpit dengan data aktual. Hal ini menunjukkan bahwa model berhasil menangkap karakteristik emisi pada masa pra-industrialisasi Indonesia.

Kesesuaian model dengan data semakin terlihat pada periode 1970-2000, dimana kurva prediksi mengikuti tren peningkatan yang semakin cepat. Model berhasil menangkap fase transisi dari pertumbuhan lambat ke pertumbuhan cepat yang terjadi selama era industrialisasi Indonesia.

Namun, beberapa deviasi antara prediksi dan data aktual dapat diamati:

1. Pada periode sekitar tahun 1940-an, model tidak dapat menangkap penurunan tajam emisi

- Setelah tahun 2000, terlihat beberapa fluktuasi dalam data aktual yang tidak dapat direpresentasikan oleh model, mengingat sifat model eksponensial yang mengasumsikan pertumbuhan yang mulus dan kontinyu

Berdasarkan hasil prediksi, model eksponensial memperkirakan emisi CO₂ Indonesia akan mencapai 1.050.000.000 ton pada tahun 2030.

Metrik	Nilai
Prediksi Emisi CO ₂ Tahun 2030	1.050.000.000 ton
Mean Squared Error (MSE)	386,5 juta ton ²
Root Mean Square Error (RMSE)	19,7 juta ton

Table 1. Hasil Prediksi dan Evaluasi Model Eksponensial

Meskipun model menunjukkan kinerja yang cukup baik dalam fitting data historis, prediksi untuk tahun 2030 perlu diinterpretasikan dengan hati-hati. Proyeksi pertumbuhan eksponensial yang berkelanjutan mungkin terlalu agresif, mengingat berbagai upaya pengurangan emisi yang sedang dan akan diimplementasikan, seperti pengembangan energi terbarukan, peningkatan efisiensi energi, dan kebijakan pembatasan emisi karbon. Faktor-faktor ini dapat menyebabkan perlambatan laju pertumbuhan emisi di masa depan.

5.3. Hasil dan Analisis Model Logistik

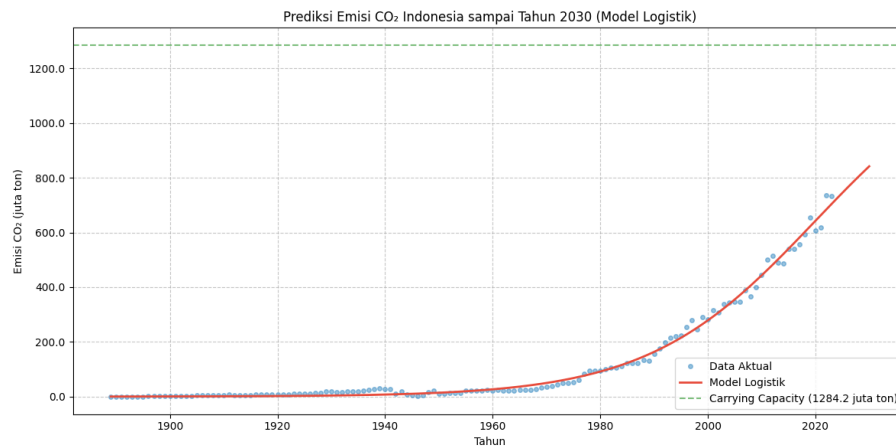


Figure 3. Perbandingan Data Aktual dan Hasil Prediksi Model Logistik

Model logistik memberikan perspektif yang berbeda dalam memprediksi emisi CO₂ Indonesia dengan mempertimbangkan adanya *carrying capacity* atau batas maksimum pertumbuhan. Berdasarkan Gambar 3, model ini menunjukkan karakteristik prediksi yang menarik untuk dianalisis.

Seperti halnya model eksponensial, model logistik berhasil menangkap fase pertumbuhan lambat pada periode awal (1889-1960) dengan sangat baik, dimana kurva prediksi (garis merah) hampir berimpit dengan data aktual (titik biru). Hal ini menunjukkan bahwa model logistik mampu merepresentasikan dinamika emisi pada masa pra-industrialisasi dengan akurat.

Pada periode (1970-2000), model logistik tetap konsisten dalam mengikuti tren peningkatan data aktual. Yang menarik, model ini memperlihatkan karakteristik yang berbeda dari model

eksponensial, dimana kurva prediksi mulai menunjukkan kecenderungan untuk melambat seiring mendekati *carrying capacity* yang diestimasi sebesar 1.284,2 juta ton.

Model logistik memberikan prediksi yang lebih moderat untuk tahun 2030 dibandingkan model eksponensial.

Metrik	Nilai
Prediksi Emisi CO ₂ Tahun 2030	841,9 juta ton
Mean Squared Error (MSE)	220,9 juta ton ²
Root Mean Square Error (RMSE)	14,9 juta ton

Table 2. Hasil Prediksi dan Evaluasi Model Logistik

Dari segi akurasi, model logistik menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan model eksponensial, terlihat dari nilai RMSE yang lebih rendah (14,9 juta ton dibandingkan 19,7 juta ton). Hal ini mengindikasikan bahwa asumsi adanya batas pertumbuhan dalam model logistik mungkin lebih sesuai dengan realitas perkembangan emisi CO₂ Indonesia.

Prediksi model logistik yang lebih konservatif ini selaras dengan ekspektasi bahwa pertumbuhan emisi akan melambat seiring dengan implementasi berbagai kebijakan pembatasan emisi dan pengembangan teknologi ramah lingkungan. *Carrying capacity* yang diestimasi model (1.284,2 juta ton) dapat diinterpretasikan sebagai batas atas teoretis emisi CO₂ Indonesia, meskipun nilai ini tentunya dapat berubah seiring dengan perkembangan teknologi dan kebijakan lingkungan.

5.4. Hasil dan Analisis Model Holt-Winters Exponential Smoothing

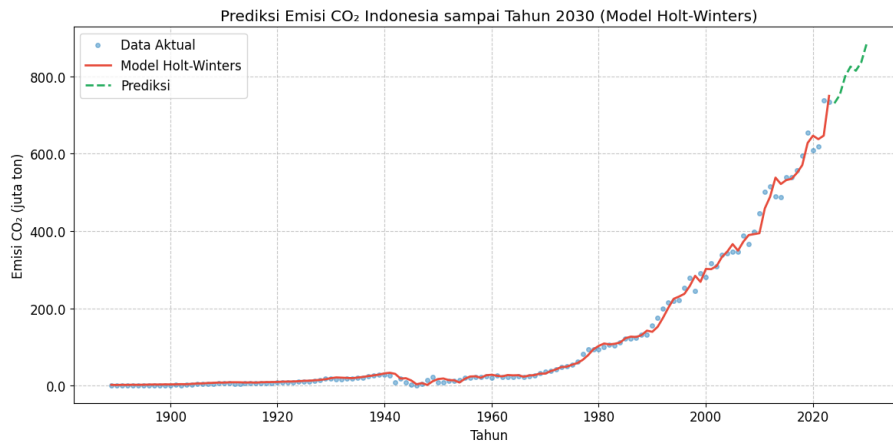


Figure 4. Perbandingan Data Aktual dan Hasil Prediksi Model Holt-Winters

Model Holt-Winters Exponential Smoothing (HWES) memberikan pendekatan yang lebih fleksibel dalam memprediksi emisi CO₂ Indonesia dengan mempertimbangkan tiga komponen utama: level, tren, dan musiman. Berdasarkan Gambar 4, model ini menunjukkan kemampuan yang sangat baik dalam mengikuti pola data historis.

Parameter *smoothing* yang dihasilkan dari proses optimasi memberikan wawasan menarik tentang karakteristik data. Nilai parameter level ($\alpha = 0,6$) yang cukup tinggi mengindikasikan bahwa model memberikan bobot yang besar pada observasi terbaru dalam menentukan level dasar emisi. Parameter trend ($\beta = 0,1$) yang relatif kecil menunjukkan bahwa komponen tren cenderung stabil

dan tidak terlalu responsif terhadap perubahan jangka pendek. Sementara itu, parameter seasonal ($\gamma = 0,2$) mengisyaratkan adanya pengaruh pola musiman yang moderat dalam data emisi.

Model HWES menunjukkan keunggulan dalam kemampuannya menangkap fluktuasi data dengan lebih detail dibandingkan kedua model sebelumnya. Hal ini terlihat jelas dari bagaimana kurva prediksi (garis merah) sangat dekat mengikuti pola data aktual (titik biru), termasuk pada periode-periode yang menunjukkan fluktuasi signifikan seperti di sekitar tahun 1940-an dan setelah tahun 2000.

Metrik	Nilai
Tahun Prediksi	2030
Prediksi Emisi CO ₂	883,9 juta ton
Mean Squared Error (MSE)	220,9 juta ton ²
Root Mean Square Error (RMSE)	14,9 juta ton
α (<i>level</i>)	0,6
β (<i>trend</i>)	0,1
γ (<i>seasonal</i>)	0,2

Table 3. Hasil Prediksi dan Evaluasi Model Holt-Winters

Dari segi akurasi, model HWES menunjukkan performa yang setara dengan model logistik dan lebih baik dari model eksponensial, dengan nilai RMSE sebesar 14,9 juta ton. Prediksi model untuk tahun 2030 sebesar 883,9 juta ton berada di antara prediksi model eksponensial yang lebih agresif dan model logistik yang lebih konservatif, menyarankan skenario pertumbuhan yang lebih moderat.

Yang membedakan model HWES adalah kemampuannya untuk memprediksi dengan memper-timbangkan pola musiman dalam data. Garis prediksi terputus-putus (hijau) menunjukkan bahwa model memperkirakan akan terjadi beberapa fluktuasi dalam pertumbuhan emisi menuju tahun 2030, berbeda dengan prediksi yang lebih halus dari model eksponensial dan logistik. Hal ini mungkin lebih mencerminkan realitas, mengingat emisi CO₂ sering dipengaruhi oleh faktor-faktor siklis seperti siklus ekonomi, perubahan kebijakan, dan dinamika pasar energi.

5.5. Analisis Komparatif Model Eksponensial, Model Logistik, dan HWES

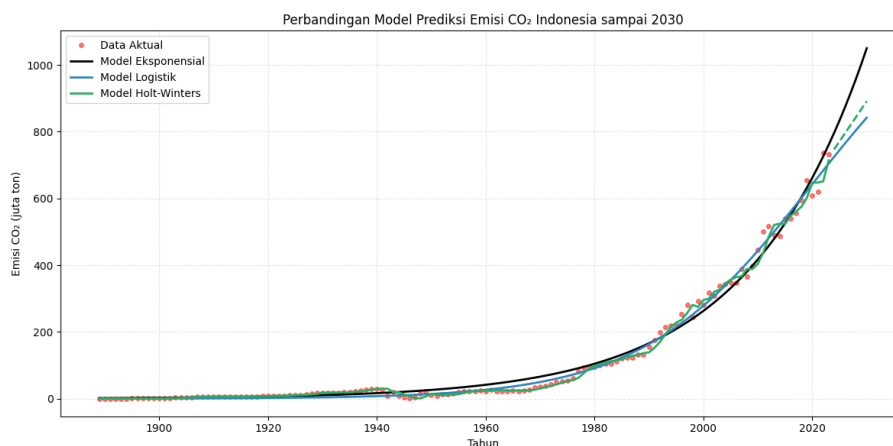


Figure 5. Perbandingan Hasil Prediksi Ketiga Model

Ketiga model yang digunakan dalam penelitian ini menunjukkan karakteristik dan kemampuan prediksi yang berbeda dalam meramalkan emisi CO₂ Indonesia hingga tahun 2030. Perbandingan kinerja ketiga model dapat dilihat melalui metrik error yang dirangkum dalam Tabel 4.

Metrik	Eksponensial	Logistik	Holt-Winters
Prediksi 2030 (juta ton)	1.050,0	841,9	891,3
MSE	386,5	220,9	235,2
RMSE	19,7	14,9	15,3

Table 4. Perbandingan Metrik Error Ketiga Model

Berdasarkan hasil yang diperoleh, terdapat perbedaan signifikan dalam prediksi emisi CO₂ Indonesia hingga tahun 2030. Model eksponensial memberikan prediksi tertinggi sebesar 1.050,0 juta ton, mencerminkan karakteristik pertumbuhan tanpa batas yang menjadi asumsi dasar model ini. Di sisi lain, model logistik menghasilkan prediksi yang lebih kecil yaitu sebesar 841,9 juta ton, dengan mempertimbangkan adanya *carrying capacity*. Model Holt-Winters memberikan prediksi menengah sebesar 891,3 juta ton.

Dari perspektif akurasi, model logistik menunjukkan performa terbaik dengan RMSE terendah sebesar 14,9 juta ton, diikuti oleh model Holt-Winters dengan RMSE 15,3 juta ton. Model eksponensial memiliki RMSE tertinggi sebesar 19,7 juta ton, yang mengindikasikan tingkat deviasi yang lebih besar dari data aktual.

Meskipun ketiga model menunjukkan kemampuan yang baik dalam menangkap tren jangka panjang data historis, masing-masing memiliki karakteristik prediksi yang berbeda. Model eksponensial cenderung menghasilkan prediksi yang lebih agresif karena asumsi pertumbuhan tanpa batas. Model logistik memberikan prediksi yang lebih moderat dengan mempertimbangkan *carrying capacity*. Sementara itu, model Holt-Winters menawarkan fleksibilitas dalam menangkap pola musiman dan fluktuasi jangka pendek.

6. Kesimpulan dan Rekomendasi

Studi komparatif menggunakan tiga model matematika (Eksponensial, Logistik, dan Holt-Winters Exponential Smoothing) untuk memprediksi emisi CO₂ Indonesia hingga tahun 2030 menunjukkan hasil yang berbeda. Model logistik menunjukkan performa terbaik dengan nilai RMSE terendah sebesar 14,9 juta ton, memberikan prediksi emisi CO₂ sebesar 841,9 juta ton pada tahun 2030. Model ini dianggap paling akurat karena mempertimbangkan batas maksimum pertumbuhan (*carrying capacity*), yang mencerminkan potensi pembatasan emisi melalui regulasi lingkungan dan pengembangan teknologi hijau.

Penelitian ini menekankan pentingnya pengembangan model prediksi yang akurat untuk mendukung pengambilan kebijakan mitigasi perubahan iklim di Indonesia. Perbedaan prediksi antara ketiga model - dari 1.050,0 juta ton (model eksponensial) hingga 841,9 juta ton (model logistik) - menggarisbawahi kompleksitas dalam memperkirakan emisi CO₂ dan kebutuhan akan pendekatan yang komprehensif dalam mengelola tantangan perubahan iklim, terutama bagi negara kepulauan seperti Indonesia yang sangat rentan terhadap dampak pemanasan global.

7. Dokumentasi Program

Seluruh dokumen pendukung penelitian dapat diakses melalui tautan Google Drive berikut:

https://drive.google.com/drive/folders/1mxXyJSBakK4sURKHZnn3u7sDlN6f78WZ?usp=drive_link

Dokumen yang tersedia meliputi:

- **Jupyter Notebook** (.ipynb): Kode sumber dan analisis data
- **Dataset** (.csv): Data emisi CO₂ yang digunakan dalam penelitian
- **Presentasi** (.pptx): Slide presentasi penelitian
- **Laporan Penelitian** (.pdf): Dokumen laporan lengkap

References

- [1] climate.gov, “Climate change: Atmospheric carbon dioxide,” 2024, diakses: 17-01-2025. [Online]. Available: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
- [2] Our World in Data, “Indonesia: Co2 country profile,” 2023, diakses: 17-01-2025. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/co2/country/indonesia>
- [3] *Inventarisasi Emisi GRK Sektor Energi*. Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2019.
- [4] *Indeks Resiko Bencana Indonesia*. Badan Nasional Penanggulangan Bencana, 2022.
- [5] Green Network, “115 pulau kecil dan sedang terancam tenggelam,” 2024, diakses: 17-01-2025. [Online]. Available: <https://greennetwork.id/kabar/115-pulau-kecil-dan-sedang-terancam-tenggelam/>
- [6] A. F. Elza Surmaini, “Kejadian iklim ekstrem dan dampaknya terhadap pertanian tanaman pangan di indonesia.” [Online]. Available: <https://epublikasi.pertanian.go.id/berkala/jsl/article/download/3357/3390/4303>
- [7] The Conversation, “Lebih dari separuh kawasan lindung karang indonesia bakal alami pemutihan massal pada 2044 akibat perubahan iklim,” 2023, diakses: 17-01-2025. [Online]. Available: <https://theconversation.com/lebih-dari-separuh-kawasan-lindung-karang-indonesia-bakal-alami-pemutihan-massal-pada-2044-akibat-perubahan-iklim>
- [8] R. P. rez Sua´ rez and A. J. s Lo´ pez Mene´ ndez, “Growing green? forecasting co2 emissions with environmental kuznets curves and logistic growth models,” *Environmental Science Policy*, 2015.
- [9] T. Alam and A. AlArjani, “A comparative study of co2 emission forecasting in the gulf countries using autoregressive integrated moving average, artificial neural network, and holt-winters exponential smoothing models,” 2021.

- [10] S. Aripriyanto¹, D. Khairani, and A. Hartono, “Co2 emission forecasting in indonesia until 2030: Evaluation of ets smoothing prediction models and their implications for global climate change mitigation,” *Journal of Applied Data Sciences*, 2024.