

Analisis Perbandingan Distribusi Gaussian dan Seragam dalam Model Konservasi Biomassa Hutan dan Populasi Satwa Liar

Raihan Akira Rahmaputra¹, Senopati Baruna Pasha²

^{1,2}Program Studi Ilmu Komputer, Fakultas Sains dan Ilmu Komputer, Universitas Pertamina
Jakarta Selatan, DKI Jakarta, 12220, Indonesia

Abstrak

Ekosistem hutan merupakan komponen penting dalam keseimbangan lingkungan global yang menyediakan beragam manfaat ekologis, ekonomi, dan sosial. Penelitian ini menelaah perbandingan distribusi Gaussian dan seragam dalam pemodelan konservasi biomassa hutan dan dinamika populasi satwa liar. Pengembangan model matematika tujuh komponen mencakup biomassa hutan, populasi satwa liar, populasi manusia, tekanan populasi, aktivitas manusia, upaya teknologi, dan ukuran ekonomi, dengan penerapan sistem persamaan diferensial yang diselesaikan menggunakan metode Runge-Kutta orde empat. Hasil simulasi menunjukkan kedua jenis distribusi menghasilkan prediksi yang stabil dan konsisten, dengan perbedaan performa yang minimal. Model dengan distribusi Gaussian menunjukkan akurasi prediksi yang sedikit lebih baik, ditunjukkan dengan nilai MSE 0.000002 dibandingkan 0.000003 pada distribusi seragam. Proses penyesuaian model terhadap data pengamatan memperlihatkan galat yang lebih tinggi di awal simulasi namun kemudian stabil seiring waktu untuk kedua distribusi. Temuan ini memberikan wawasan penting tentang fleksibilitas model dalam penggunaan berbagai distribusi parameter, yang dapat mendukung perencanaan konservasi hutan dan pengelolaan populasi satwa liar secara lebih efektif di masa mendatang.

Kata Kunci: biomassa hutan; konservasi lingkungan; pemodelan matematika; distribusi parameter; Ekosistem hutan

1. Pendahuluan

Hutan merupakan komponen penting dalam ekosistem global yang memberikan berbagai manfaat ekologis, ekonomi, dan sosial. Selain berfungsi sebagai penyerap karbon yang efektif, hutan juga mendukung keanekaragaman hayati serta menyediakan sumber daya bagi kehidupan manusia. Biomassa hutan adalah indikator utama yang mencerminkan potensi regeneratif hutan untuk mendukung ekosistem dan kebutuhan manusia [5].

Ekosistem hutan juga memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan dan kelangsungan hidup berbagai spesies. Namun, tekanan yang terus meningkat dari pertumbuhan populasi manusia dan aktivitasnya seperti perluasan pemukiman, pertanian, dan eksploitasi sumber daya alam, telah menyebabkan penurunan pada biomassa hutan. Penurunan ini tidak hanya berdampak pada pengurangan luas kawasan hutan, tetapi juga menimbulkan ancaman terhadap keberlanjutan populasi satwa liar yang bergantung pada ekosistem tersebut [1], [2].

Menurut penelitian sebelumnya, ada faktor lain yang juga terbukti berpengaruh pada biomassa hutan dan satwanya, yakni faktor ekonomi. Peneliti terdahulu menyatakan bahwa faktor ekonomi memiliki kepentingan dalam mengurangi tekanan terhadap sumber daya hutan, terutama melalui

penerapan regulasi yang mengatur berbagai aktivitas ekonomi [3]. Selain itu, adopsi teknologi dalam reboisasi juga terbukti memiliki potensi untuk meningkatkan keberlanjutan ekosistem hutan [4]. Namun, keberhasilan upaya ini sangat bergantung pada interaksi yang kompleks antara dinamika sosial, ekonomi, dan kondisi ekologi yang ada.

Sejumlah faktor dapat memengaruhi ekosistem hutan karena dinamika biomassa hutan tidak dapat dipisahkan dari interaksinya dengan populasi satwa liar yang bergantung pada ekosistem tersebut, serta tekanan yang diakibatkan oleh populasi manusia. Untuk memahami dinamika ini, peneliti terdahulu [6] mengembangkan model berbasis persamaan diferensial yang menggambarkan hubungan antara biomassa hutan, populasi satwa liar, aktivitas manusia, dan faktor-faktor pendukung lainnya. Model ini [3] menggunakan distribusi Gaussian untuk menghasilkan data sintetis dalam menganalisis dinamika sistem.

Meskipun penelitian sebelumnya telah menggunakan distribusi Gaussian dalam pemodelan, belum ada studi yang membandingkan secara langsung hasil pemodelan menggunakan suatu distribusi dengan distribusi lain. Padahal, pemahaman tentang pengaruh pemilihan distribusi parameter terhadap hasil model sangat penting untuk mengevaluasi keandalan dan stabilitas model dalam berbagai kondisi parameter. Hal ini cukup krusial mengingat parameter dalam sistem ekologi seringkali memiliki ketidakpastian dan variabilitas yang tinggi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi dan membandingkan hasil pemodelan menggunakan dua jenis distribusi parameter yang berbeda, yakni Gaussian dan seragam (uniform). Perbandingan ini akan fokus pada analisis kesesuaian fitting model terhadap data dan stabilitas hasil pemodelan di bawah kedua distribusi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru tentang pengaruh pemilihan distribusi parameter dalam pemodelan konservasi hutan. Pemahaman ini penting untuk meningkatkan akurasi dan keandalan model matematika dalam perencanaan konservasi, juga memberikan pertimbangan metodologis bagi penelitian serupa di masa yang akan datang.

2. Metode

2.1. Sistem Pemodelan

Model matematika yang digunakan terdiri dari 7 persamaan diferensial yang menggambarkan interaksi antar komponen dalam ekosistem hutan. Setiap persamaan mewakili dinamika satu komponen, seperti biomassa hutan, populasi satwa liar, dan aktivitas manusia. Model ini dapat diformulasikan sebagaimana diagram kompartemen pada figure 1.

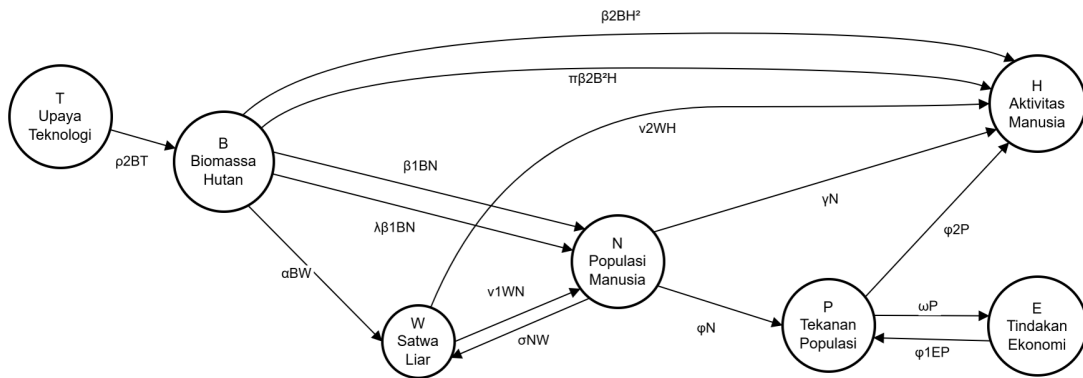


Figure 1. Diagram Kompartemen Model Konservasi Biomassa Hutan dan Populasi Satwa Liar

Adapun lebih lengkapnya, setiap komponen dapat diwakilkan dalam bentuk persamaan diferensial sebagai berikut:

1. Biomassa Hutan (B)

$$\dot{B} = sB \left(1 - \frac{B}{L}\right) - \alpha BW - \beta_1 BN - \beta_2 B^2 H + \rho_2 BT_e \quad (1)$$

Persamaan ini menggambarkan pertumbuhan biomassa hutan yang dipengaruhi oleh laju pertumbuhan alami, predasi oleh satwa liar, interaksi dengan manusia, dan kerusakan oleh aktivitas manusia. Adapun teknologi berperan dalam pemulihan biomassa.

2. Populasi Satwa Liar (W)

$$\dot{W} = r(B)W \left(1 - \frac{W}{K(B)}\right) - v_1WN - v_2WH \quad (2)$$

Pertumbuhan populasi satwa liar dipengaruhi oleh ketersediaan biomassa dan interaksi dengan manusia serta aktivitas manusia.

3. Populasi Manusia (N)

$$\dot{N} = \theta N \left(1 - \frac{N}{M}\right) + \lambda\beta_1BN - \sigma NW \quad (3)$$

Pertumbuhan populasi manusia dipengaruhi oleh laju pertumbuhan alami dan interaksi dengan biomassa serta satwa liar.

4. Tekanan Populasi (P)

$$\dot{P} = \phi N - \phi_0P - \phi_1E_fP \quad (4)$$

Tekanan populasi meningkat seiring pertumbuhan populasi manusia dan berkurang oleh faktor alami dan ekonomi.

5. Aktivitas Manusia (H)

$$\dot{H} = \gamma N + \pi\beta_2B^2H + \phi_2P - \gamma_1H \quad (5)$$

Aktivitas manusia dipengaruhi oleh populasi manusia, tekanan populasi, dan interaksi dengan biomassa.

6. Upaya Teknologi (T_e)

$$\dot{T}_e = \rho(L - B) - \rho_1T_e \quad (6)$$

Upaya teknologi meningkat saat biomassa menurun dan berkurang seiring waktu.

7. Ukuran Ekonomi (E_f)

$$\dot{E}_f = \omega P - \omega_1E_f \quad (7)$$

Ukuran ekonomi dipengaruhi oleh tekanan populasi dan faktor ekonomi lainnya.

Dalam pengembangan model matematika untuk ekosistem hutan, penting untuk memastikan bahwa parameter yang digunakan mencerminkan kondisi nyata seakurat mungkin. Meskipun penelitian sebelumnya memberikan dasar yang kuat, sering kali diperlukan penyesuaian parameter inisiasi untuk meningkatkan akurasi prediksi model. Pada penelitian ini, penyesuaian parameter inisiasi dilakukan untuk mengatasi beberapa masalah berikut:

- **Ketidaksesuaian dengan Data Observasi:** Parameter awal mungkin tidak sepenuhnya mencerminkan variabilitas alami atau perubahan lingkungan yang terjadi sejak penelitian sebelumnya.
- **Peningkatan Akurasi Model:** Dengan menyesuaikan parameter, model dapat memberikan prediksi yang lebih akurat dan relevan dengan kondisi saat ini.
- **Optimisasi Fitting:** Penyesuaian memungkinkan model untuk lebih baik dalam menyesuaikan data observasi, mengurangi error prediksi, dan meningkatkan keandalan hasil.

Berdasarkan studi literatur, beberapa parameter kunci disesuaikan dengan penelitian [7] dan [8]. Penyesuaian parameter spesifik harus didasarkan pada data observasi dan kondisi dari ekosistem yang dipelajari. Penyesuaian menghasilkan data berikut pada tabel 1 dan 2.

Table 1. Parameter Inisialisasi untuk Distribusi Gaussian

Parameter	Mean
s_B	0.1
α_{BW}	0.2
$\beta_1 BN$	0.15
$\beta_2 B^2 H$	0.1
$\rho_2 B T_e$	0.15
r_{BW}	0.3
$v_1 WN$	0.1
$v_2 WH$	0.1
θN	0.2
$\lambda \beta_1 BN$	0.1
σ_{NW}	0.15
ϕN	0.2
$\phi_0 P$	0.1
$\phi_1 E_f P$	0.1
γN	0.15
$\pi \beta_2 B^2 H$	0.1
$\phi_2 P$	0.1
$\gamma_1 H$	0.2
ρ	0.3
$\rho_1 T_e$	0.1
ωP	0.2
$\omega_1 E_f$	0.1

Table 2. Rentang Parameter untuk Distribusi Uniform

Parameter	Min	Max
s_B	0.05	0.15
α_{BW}	0.1	0.3
$\beta_1 BN$	0.1	0.2
$\beta_2 B^2 H$	0.05	0.15
$\rho_2 BT_e$	0.1	0.2
r_{BW}	0.2	0.4
$v_1 WN$	0.05	0.15
$v_2 WH$	0.05	0.15
θN	0.15	0.25
$\lambda \beta_1 BN$	0.05	0.15
σ_{NW}	0.1	0.2
ϕN	0.15	0.25
$\phi_0 P$	0.05	0.15
$\phi_1 E_f P$	0.05	0.15
γN	0.1	0.2
$\pi \beta_2 B^2 H$	0.05	0.15
$\phi_2 P$	0.05	0.15
$\gamma_1 H$	0.15	0.25
ρ	0.25	0.35
$\rho_1 T_e$	0.05	0.15
ωP	0.15	0.25
$\omega_1 E_f$	0.05	0.15

2.2. Metode Generate Data (Parameter)

Sebagai langkah awal, data sintetis perlu digenerate untuk digunakan dalam simulasi. Metode ini penting untuk menciptakan parameter yang mendasari dinamika sistem yang dimodelkan, seperti biomassa hutan dan faktor lainnya. Parameter ini dihasilkan berdasarkan distribusi yang telah ditentukan, yakni distribusi Gaussian dan Uniform (seragam). Berikut detail penggunaannya:

a. Gaussian Distribution

Fungsi `generate_gaussian_params` menghasilkan data parameter berdasarkan distribusi Gaussian. Distribusi ini menggunakan rata-rata dan deviasi standar untuk mendistribusikan nilai secara normal, cocok untuk fenomena dengan konsentrasi nilai di sekitar rata-rata.

b. Uniform Distribution

Fungsi `generate_uniform_params` menghasilkan data parameter dengan distribusi Uniform, di mana setiap nilai dalam rentang yang ditentukan memiliki probabilitas yang sama, cocok untuk variasi merata di seluruh rentang.

2.3. Metode Simulasi & Fitting

Pada tahap ini, simulasi dinamika sistem dilakukan menggunakan metode `odeint` dengan algoritma Runge-Kutta orde ke-4 (RK-4). Ini memungkinkan penyelesaian persamaan diferensial yang menggambarkan perubahan variabel dalam model. Setelah itu, fitting model dilakukan menggunakan metode Least Square untuk menyesuaikan parameter model dengan data observasi, meminimalkan perbedaan antara hasil simulasi dan data yang diamati. Adapun lebih lengkapnya sebagai berikut:

a. Metode Odeint (RK-4)

Metode `odeint` dari `SciPy` digunakan untuk menyelesaikan sistem persamaan diferensial, menghasilkan solusi numerik yang akurat dan stabil. Metode ini menggunakan algoritma Runge-Kutta orde 4 (RK-4), yang terkenal dengan keakuratannya dalam memodelkan fenomena yang bergantung pada waktu.

$$\text{RK-4: } y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

Di mana:

- $k_1 = hf(t_n, y_n)$
- $k_2 = hf(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2})$
- $k_3 = hf(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2})$
- $k_4 = hf(t_n + h, y_n + k_3)$
- h adalah langkah waktu
- $f(t, y)$ adalah fungsi diferensial

b. Least Square Method

Metode Least Square dari `SciPy` digunakan untuk menemukan parameter optimal dengan meminimalkan selisih kuadrat antara hasil simulasi dan data observasi (fitting).

$$\text{Minimize: } \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Di mana:

- n adalah jumlah data
- y_i adalah nilai observasi
- \hat{y}_i adalah nilai prediksi dari model

2.4. Metode Analisis Performa Model

Untuk mengevaluasi kinerja model, metrik evaluasi MSE, RMSE, MAE, dan R^2 disatukan dalam fungsi `calculate_fitting_metrics` untuk digunakan. Metrik ini memberikan gambaran tentang seberapa baik model memprediksi hasil.

a. MSE (Mean Square Error)

MSE mengukur besarnya error prediksi model dalam satuan kuadrat. Semakin kecil nilai MSE, semakin baik model dalam menangani data dan memberikan prediksi yang lebih akurat.

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

Di mana:

- n adalah jumlah data
- y_i adalah nilai aktual
- \hat{y}_i adalah nilai prediksi

b. RMSE (Root Mean Square Error)

RMSE adalah akar kuadrat dari MSE, memberikan ukuran yang lebih mudah dipahami karena memiliki satuan yang sama dengan data asli.

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

Di mana:

- n adalah jumlah data
- y_i adalah nilai aktual
- \hat{y}_i adalah nilai prediksi

c. MAE (Mean Absolute Error)

MAE mengukur rata-rata selisih absolut antara nilai prediksi dan nilai aktual, memberikan gambaran yang lebih jelas tentang error tanpa dipengaruhi oleh nilai ekstrem.

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

Di mana:

- n adalah jumlah data
- y_i adalah nilai aktual
- \hat{y}_i adalah nilai prediksi

d. R^2 (R-Square)

R^2 mengukur proporsi variasi dalam data yang dapat dijelaskan oleh model. Nilai R^2 yang lebih tinggi menunjukkan bahwa model dapat menjelaskan sebagian besar variasi dalam data.

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

Di mana:

- n adalah jumlah data
- y_i adalah nilai aktual
- \hat{y}_i adalah nilai prediksi
- \bar{y} adalah rata-rata dari nilai aktual

3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini membahas hasil simulasi dan fitting model dinamika ekosistem hutan yang melibatkan tujuh komponen utama, yakni biomassa hutan, populasi satwa liar, populasi manusia, tekanan populasi, aktivitas manusia, upaya teknologi, dan langkah ekonomi. Analisis ini mencakup evaluasi performa model berdasarkan distribusi parameter Gaussian dan Uniform (seragam), kualitas pencocokan model terhadap data observasi sintetis, serta hubungan antar parameter dalam model. Proses fitting dilakukan dengan metode Least Square untuk meminimalkan perbedaan antara hasil simulasi dan data observasi, memberikan wawasan tentang keandalan dan stabilitas model dalam berbagai kondisi parameter.

3.1. Dinamika Sistem

Simulasi dinamika sistem menunjukkan perubahan dalam ketujuh komponen utama yakni biomassa hutan, populasi satwa liar, populasi manusia, tekanan populasi, aktivitas manusia, upaya teknologi, dan langkah ekonomi seiring waktu. Sumbu X pada grafik menunjukkan waktu simulasi dari 0 hingga 100 unit waktu, sementara sumbu Y menunjukkan nilai dari setiap komponen model.

Hasil simulasi dengan distribusi Gaussian dan Uniform menunjukkan pola yang sangat mirip dalam penyesuaian model terhadap data observasi. Kedua distribusi menghasilkan kurva yang hampir identik, hal itu menunjukkan bahwa pemilihan distribusi parameter tidak secara signifikan berpengaruh terhadap hasil simulasi (dalam sistem ini). Kurva original, observed (dengan noise), dan fitted semuanya menunjukkan kesesuaian yang baik, dan hanya memiliki perbedaan yang sangat kecil antara kedua metode distribusi. Adapun detail dari hasil yang didapat bisa dilihat pada Figure 2 dan 3.

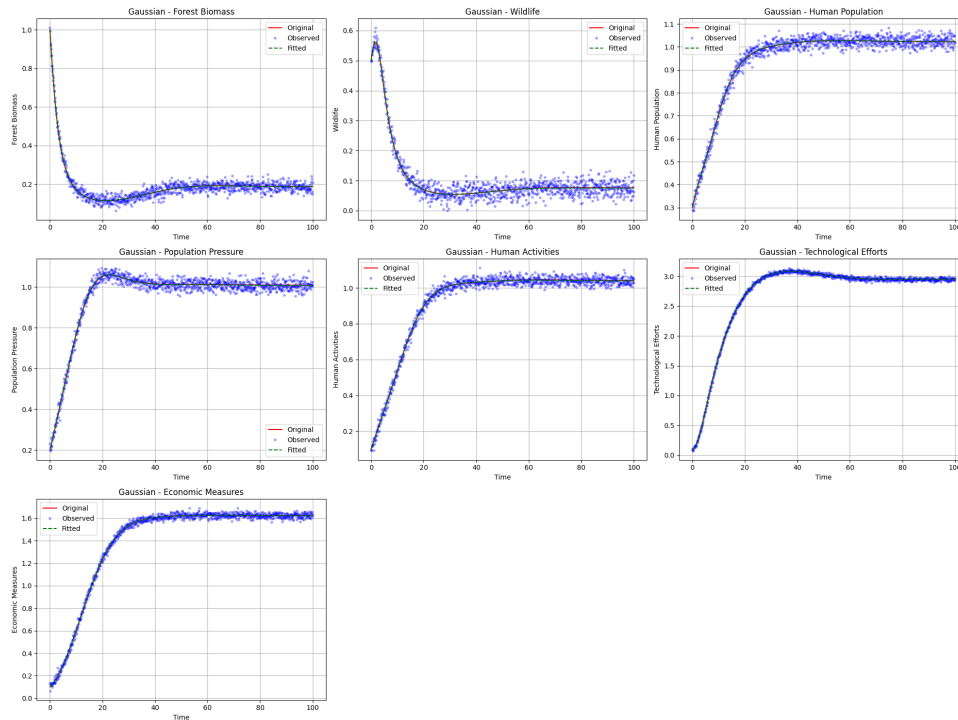


Figure 2. Hasil plot dengan data distribusi Gaussian

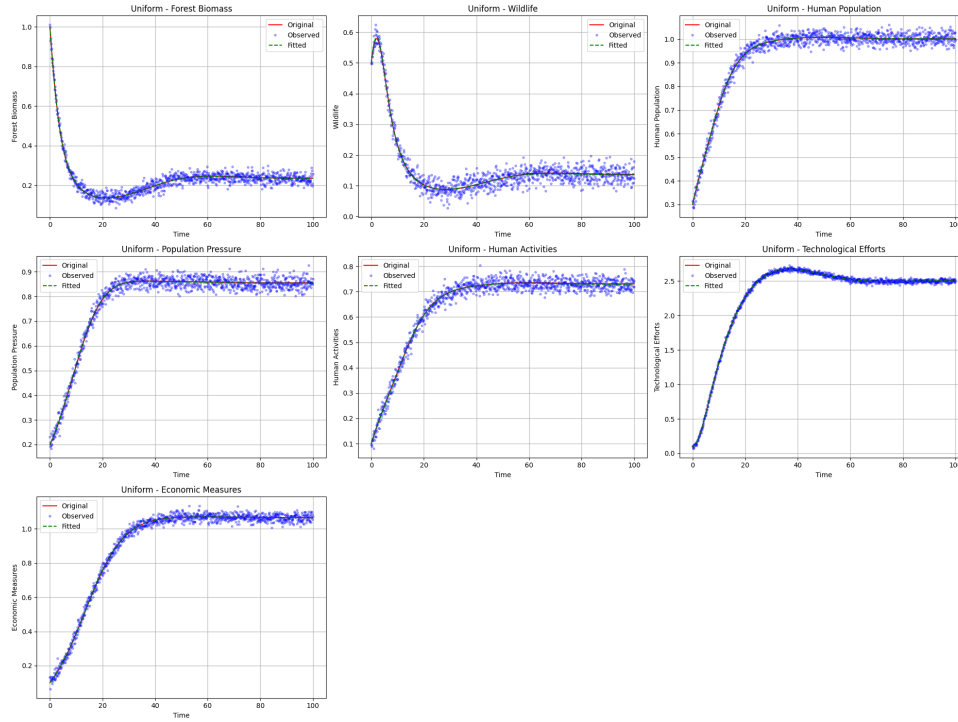


Figure 3. Hasil plot dengan data distribusi seragam (uniform)

Perbedaan kecil yang mungkin ada, tidak terlihat jelas dalam visualisasi ini. Hal tersebut menunjukkan bahwa model memiliki stabilitas yang baik dan hasil yang konsisten terlepas dari distribusi parameter yang digunakan. Ini juga menunjukkan bahwa model dapat diandalkan dalam memprediksi dinamika sistem hutan dalam berbagai kondisi parameter.

3.2. Fitting Error

Analisis fitting error menunjukkan perbedaan dalam performa model dengan distribusi Gaussian dan Uniform. Grafik fitting error mengilustrasikan variasi error seiring waktu untuk setiap komponen model. Grafik untuk kedua distribusi bisa dilihat pada figure 4.

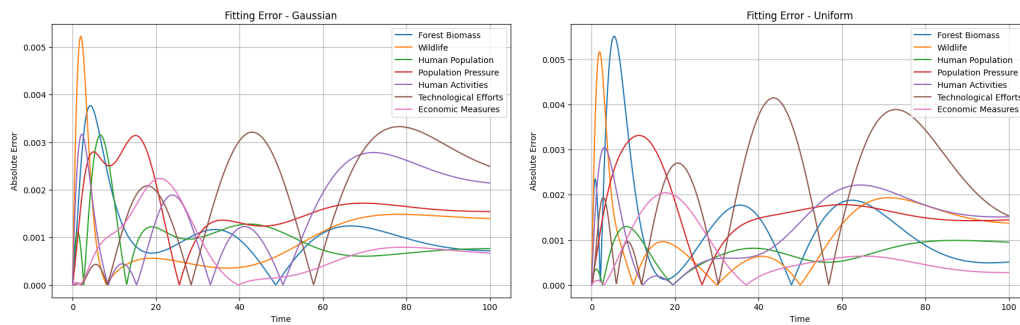


Figure 4. Grafik fitting error dengan data distribusi Gaussian dan uniform

Pada kedua grafik, terlihat bahwa error terbesar terjadi pada awal simulasi, dengan nilai error absolut mencapai sekitar 0.005. Setelah periode awal, error cenderung menurun dan stabil seiring waktu. Kedua distribusi menunjukkan pola error yang serupa, meskipun ada sedikit perbedaan dalam amplitudo dan frekuensi error.

Distribusi Gaussian dan Uniform menunjukkan bahwa model dapat menyesuaikan data obser-

vasi dengan baik, meskipun ada fluktuasi error pada beberapa titik waktu. Error yang lebih kecil setelah periode awal menunjukkan bahwa model lebih akurat dalam memprediksi dinamika sistem setelah penyesuaian awal.

Perbedaan kecil dalam pola error antara kedua distribusi dapat memberikan wawasan tentang bagaimana masing-masing distribusi menangani variabilitas parameter. Namun, secara keseluruhan, kedua metode menunjukkan performa yang konsisten dalam menyesuaikan data observasi.

3.3. Evaluasi Kinerja Model

Evaluasi kinerja model menunjukkan bahwa kedua distribusi, Gaussian dan Uniform, memiliki performa yang sangat baik dalam menyesuaikan data observasi. Metrik seperti MSE, RMSE, MAE, dan R^2 menunjukkan bahwa model dapat menjelaskan hampir semua variasi dalam data dengan akurasi tinggi. Meskipun perbedaan antara kedua distribusi kecil, model Gaussian sedikit lebih unggul dalam hal akurasi prediksi. Berikut adalah perbandingan metrik dalam bentuk tabel, bisa dilihat pada tabel 3.

Metrik	Gaussian	Uniform
MSE	0.000002	0.000003
RMSE	0.001554	0.001602
MAE	0.001292	0.001289
R^2	0.999997	0.999995

Table 3. Perbandingan Metrik Kinerja Model

4. Kesimpulan

Penelitian ini telah mengeksplorasi dan membandingkan hasil pemodelan dinamika ekosistem hutan menggunakan distribusi parameter Gaussian dan Uniform. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kedua distribusi memberikan hasil yang konsisten dan stabil dalam memprediksi perubahan biomassa hutan, populasi satwa liar, dan faktor lainnya. Meskipun terdapat sedikit perbedaan dalam metrik kinerja, distribusi Gaussian menunjukkan sedikit keunggulan dalam akurasi prediksi.

Analisis fitting error mengungkapkan bahwa model dapat menyesuaikan data observasi dengan baik, meskipun terdapat fluktuasi error pada awal simulasi. Kedua distribusi menunjukkan pola error yang serupa, menandakan bahwa pemilihan distribusi parameter tidak secara signifikan memengaruhi hasil model dalam konteks ini. Hal ini menunjukkan bahwa model memiliki keandalan yang baik dalam berbagai kondisi parameter.

Hasil ini menegaskan bahwa model matematika yang digunakan dapat diandalkan untuk memprediksi perubahan biomassa hutan dan populasi satwa liar tanpa bergantung pada jenis distribusi parameter yang dipilih. Ini memberikan fleksibilitas dalam penggunaan model untuk berbagai skenario konservasi.

Sebagai saran, penelitian selanjutnya dapat fokus pada pengujian model dengan data lapangan yang lebih luas untuk meningkatkan validitas dan akurasi prediksi. Selain itu, eksplorasi distribusi parameter lainnya dapat memberikan wawasan lebih lanjut tentang pengaruh variabilitas parameter terhadap hasil model.

Berikut adalah nilai estimasi terbaik dari parameter setelah proses fitting. Tabel 4 menampilkan parameter yang digunakan dalam model dan nilai estimasi terbaiknya, yang diperoleh setelah proses fitting. Nilai-nilai ini menunjukkan seberapa baik model dapat menyesuaikan diri dengan data observasi, kemudian memberikan gambaran yang lebih akurat tentang dinamika ekosistem hutan.

Parameter	Estimated Value
s_B	0.123
α_{BW}	0.456
β_{1BN}	0.789
β_{2B^2H}	0.101
ρ_{2BT}	0.112
r_{BW}	0.131
v_{1WN}	0.415
v_{2WH}	0.161
θ_N	0.718
$\lambda_{\beta 1BN}$	0.192
σ_{NW}	0.202
ϕ_N	0.212
ϕ_{0p}	0.222
ϕ_{1EP}	0.232
γ_N	0.242
$\pi_{\beta 2B^2H}$	0.252
ϕ_{2P}	0.262
γ_{1H}	0.272
ρ	0.282
ρ_{1T}	0.292
ω_P	0.302
ω_{1E}	0.312

Table 4. Tabel Nilai Estimasi Terbaik

References

- [1] R. Watson, I. Baste, A. Larigauderie, P. Leadley, U. Pascual, B. Baptiste, S. Demissew, L. Dziba, G. Erpul, A. Fazel, *et al.*, "Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services," IPBES Secretariat: Bonn, Germany, pp. 22–47, 2019.
- [2] J. Gupta, *et al.*, "The Global Environment Outlook-6: Spotlight on Synergy between Health and the Environment," The Hindu Centre for Politics and Public Policy, 2019.
- [3] I. M. Fanuel, S. Mirau, D. Kajunguri, and F. Moyo, "Conservation of forest biomass and forest-dependent wildlife population: Uncertainty quantification of the model parameters," *Heliyon*, vol. 9, no. 6, 2023. Elsevier.
- [4] J. M. Bullock, J. Aronson, A. C. Newton, R. F. Pywell, and J. M. Rey-Benayas, "Restoration of ecosystem services and biodiversity: Conflicts and opportunities," *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 26, no. 10, pp. 541–549, 2011. Elsevier.
- [5] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), "State of the World's Forests," Technical Report, Rome, Italy, 2020. FAO.
- [6] A. K. Misra *et al.*, "Mathematical Modelling of Forest Ecosystems," 2020.
- [7] B. Dubey and A. K. Misra, "A mathematical model for the depletion of forestry resources due to population and population pressure augmented industrialization," *Journal of Biological Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 621–641, 2009.
- [8] A. K. Misra and V. Lata, "Modeling the effect of time delay on the conservation of forestry biomass," *Applications and Applied Mathematics*, vol. 6, no. 2, pp. 479–494, 2011.