Mathematical and Data Analytics
Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7619

Simulasi Numerik dan Pembangkitan Dataset Sintetis Model Dinamika Populasi untuk Analisis Pertumbuhan, Interaksi Spesies, dan Penyebaran Epidemi

Wina Arisah Sipahutar[1)], Aulia Juanda DJS, S.Si, M.Si[2)]
[1,)] Institut Teknologi Sawit Indonesia(ITSI), [2)] STIPER Agrobisnis Perkebunan (STIPAP)
Winasipahutar451@email.com[1)], aulia_juanda@ymail.com[2)]

Histori Naskah:
Diajukan: 20-11-2025
Disetujui: 05-12-2025
Publikasi:13-12-2025

ABSTRAK

Dinamika populasi merupakan sistem kompleks yang dipengaruhi oleh pertumbuhan individu, interaksi antarspesies, dan perubahan kondisi epidemi. Model matematika seperti pertumbuhan logistik, Lotka-Volterra, dan SIR telah banyak digunakan untuk memahami mekanisme perubahan populasi, namun sebagian besar kajian masih berfokus pada analisis perilaku sistem pada skenario parameter tertentu dan belum diarahkan sebagai sumber dataset terstruktur. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dataset sintetis berbasis simulasi numerik dari beberapa model dinamika populasi untuk merepresentasikan hubungan antara parameter model dan respons populasi terhadap waktu. Simulasi dilakukan menggunakan persamaan diferensial biasa yang diselesaikan secara numerik menggunakan metode Runge-Kutta orde empat. Model yang digunakan meliputi pertumbuhan populasi logistik, interaksi predator-mangsa Lotka-Volterra, serta penyebaran epidemi model SIR. Variasi parameter dilakukan pada setiap model untuk menghasilkan berbagai konfigurasi simulasi, kemudian keluaran numerik disusun menjadi dataset yang terdiri atas parameter masukan dan variabel respons populasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa setiap model menghasilkan karakteristik perubahan populasi yang berbeda sesuai dengan struktur matematis dan parameter yang digunakan. Model logistik menghasilkan perubahan populasi menuju kondisi batas model, model predator-mangsa menghasilkan variasi populasi dua spesies secara simultan, sedangkan model SIR menghasilkan perubahan distribusi populasi pada kelompok rentan, terinfeksi, dan pulih. Dataset sintetis yang dihasilkan mempertahankan informasi parameter pembentuk dan respons sistem pada setiap langkah waktu simulasi. Pendekatan ini menunjukkan bahwa simulasi numerik dapat dimanfaatkan sebagai metode pembangkitan dataset berbasis mekanisme untuk mendukung analisis dinamika populasi dan pengembangan pendekatan berbasis data.

Kata kunci: *dinamika populasi; simulasi numerik; dataset sintetis; model SIR; Lotka-Volterra; pertumbuhan logistik.*

PENDAHULUAN

Dinamika populasi merupakan salah satu kajian penting dalam matematika terapan dan ilmu biologi karena menggambarkan perubahan jumlah individu akibat pengaruh faktor internal maupun eksternal dalam suatu sistem. Perubahan populasi tidak hanya ditentukan oleh kemampuan reproduksi suatu organisme, tetapi juga dipengaruhi oleh keterbatasan sumber daya, interaksi antarspesies, serta tekanan lingkungan. Kompleksitas hubungan tersebut menyebabkan pendekatan berbasis model matematis banyak digunakan untuk memahami mekanisme

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7619

perubahan populasi dan menjelaskan perilaku sistem biologis secara kuantitatif (Murray, 2002; Edelstein-Keshet, 2005).

Model pertumbuhan logistik merupakan salah satu model fundamental dalam kajian dinamika populasi yang memperkenalkan konsep daya dukung lingkungan (*carrying capacity*) sebagai faktor pembatas pertumbuhan. Model ini menjelaskan bahwa populasi mengalami pertumbuhan awal yang cepat, kemudian mengalami perlambatan ketika mendekati kapasitas lingkungan (Verhulst, 1838; May, 1976). Namun, dinamika populasi dalam sistem biologis sering kali tidak hanya dipengaruhi oleh faktor internal populasi, tetapi juga oleh interaksi dengan organisme lain. Hal tersebut mendorong perkembangan model interaksi seperti Lotka-Volterra yang menjelaskan hubungan predator-mangsa, serta model kompetisi dan mutualisme yang menggambarkan pengaruh antarspesies terhadap perubahan populasi (Lotka, 1925; Volterra, 1926).

Selain sistem ekologi, pendekatan model matematis juga memiliki peranan penting dalam memahami penyebaran penyakit menular. Model SIR yang dikembangkan oleh Kermack dan McKendrick menjadi dasar dalam pemodelan epidemi dengan membagi populasi menjadi kelompok rentan (*susceptible*), terinfeksi (*infected*), dan pulih (*recovered*) (Kermack & McKendrick, 1927). Pengembangan lebih lanjut menghasilkan model SEIR yang memasukkan fase terpapar (*exposed*) untuk menggambarkan periode inkubasi penyakit secara lebih realistis (Hethcote, 2000). Model-model tersebut telah banyak digunakan untuk menganalisis pengaruh parameter epidemi seperti laju transmisi dan pemulihan terhadap pola penyebaran penyakit (Brauer et al., 2019).

Meskipun model matematika klasik telah memberikan kontribusi besar dalam menjelaskan mekanisme dinamika populasi, sebagian besar penelitian masih berfokus pada analisis perilaku sistem berdasarkan formulasi model tertentu. Evaluasi umumnya dilakukan melalui perubahan populasi terhadap waktu, analisis kestabilan, titik kesetimbangan, maupun karakteristik osilasi sistem (Strogatz, 2018). Pendekatan tersebut memiliki keunggulan dalam memberikan interpretasi mekanistik yang kuat, tetapi keluaran simulasi sering terbatas pada satu konfigurasi parameter sehingga belum sepenuhnya berkembang menjadi representasi data yang mampu menggambarkan variasi sistem secara luas.

Di sisi lain, perkembangan pendekatan berbasis *machine learning* dan analisis berbasis data dalam bidang ekologi serta epidemiologi meningkatkan kebutuhan terhadap dataset dalam jumlah besar yang mampu merepresentasikan variasi dinamika sistem. Namun, dataset biologis hasil observasi memiliki tantangan tersendiri karena dipengaruhi oleh ketidakpastian pengukuran, variasi lingkungan, keterbatasan periode observasi, serta sulitnya memperoleh kondisi eksperimen yang sepenuhnya terkontrol. Akibatnya, terdapat kesenjangan antara kebutuhan metode berbasis data terhadap dataset yang luas dengan kebutuhan model biologis terhadap representasi mekanisme yang dapat dijelaskan (Karniadakis et al., 2021; Willard et al., 2022).

Kesenjangan tersebut semakin terlihat karena berbagai fenomena dinamika populasi masih banyak dikaji menggunakan model yang berdiri secara terpisah. Model logistik, Lotka-Volterra, kompetisi, mutualisme, dan epidemi memiliki karakteristik matematis serta pola respons yang berbeda, tetapi umumnya dianalisis sebagai sistem individual. Pendekatan yang mengubah berbagai model dinamika populasi tersebut menjadi dataset sintetis terstruktur masih memiliki peluang pengembangan, terutama untuk menghasilkan data yang tidak hanya merekam perubahan populasi, tetapi juga mempertahankan hubungan antara parameter biologis dan respons sistem.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan pendekatan simulasi numerik untuk membangkitkan dataset sintetis berbasis model dinamika populasi. Berbeda

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7619

dengan pendekatan yang hanya menggunakan simulasi untuk memperoleh solusi satu skenario, penelitian ini memanfaatkan simulasi sebagai mekanisme pembentukan dataset yang menghubungkan parameter model dengan perubahan populasi terhadap waktu. Model yang digunakan mencakup pertumbuhan logistik, interaksi predator-mangsa, interaksi spesies, serta penyebaran epidemi.

Pendekatan ini tidak bertujuan menggantikan data observasi biologis, tetapi menyediakan representasi numerik berbasis mekanisme yang mempertahankan karakteristik matematis dari sistem yang dimodelkan. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kerangka pembangkitan dataset sintetis yang menjembatani pendekatan berbasis model matematis dengan kebutuhan analisis berbasis data pada sistem dinamika populasi.

METODE PENELITIAN

Kerangka Simulasi Dinamika Populasi

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi numerik untuk membangkitkan dataset sintetis berbasis beberapa model dinamika populasi. Model yang digunakan dipilih untuk merepresentasikan beberapa karakteristik perubahan sistem biologis, yaitu pertumbuhan populasi, interaksi antarspesies, dan penyebaran epidemi.

Setiap model diselesaikan secara numerik untuk memperoleh perubahan variabel populasi terhadap waktu. Parameter model divariasikan secara terkontrol untuk menghasilkan berbagai kondisi simulasi, kemudian seluruh keluaran simulasi disusun menjadi dataset sintetis yang terdiri atas parameter masukan dan respons dinamika populasi.

Model Pertumbuhan Populasi Logistik

Pertumbuhan populasi dasar dimodelkan menggunakan persamaan logistik:

$$\frac{dN}{dt} = rN\left(1 - \frac{N}{K}\right)$$

dengan:

- N= jumlah populasi,
- r= laju pertumbuhan intrinsik,
- K= kapasitas maksimum lingkungan (*carrying capacity*),
- t= waktu simulasi.

Model ini digunakan untuk merepresentasikan perubahan populasi ketika pertumbuhan awal mengalami pembatasan akibat keterbatasan sumber daya lingkungan.

Model Interaksi Predator-Mangsa

Hubungan antara dua spesies dimodelkan menggunakan persamaan Lotka-Volterra:

$$\frac{dH}{dt} = \alpha H - \beta HP$$
$$\frac{dP}{dt} = \delta HP - \gamma P$$

dengan:

- H= populasi mangsa (*prey*),
- P= populasi predator,
- α= laju pertumbuhan mangsa,
- β= koefisien interaksi predator-mangsa,
- δ= efisiensi pertumbuhan predator,
- γ= laju kematian predator.

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7619

Model ini digunakan untuk menghasilkan pola perubahan dua populasi yang saling berinteraksi dalam suatu sistem ekologi.

Model Penyebaran Epidemi SIR

Dinamika penyebaran penyakit dimodelkan menggunakan model SIR:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI$$
$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I$$
$$\frac{dR}{dt} = \gamma I$$

dengan:

- S= populasi rentan (*susceptible*),
- I= populasi terinfeksi (*infected*),
- R= populasi pulih (*recovered*),
- β= laju transmisi penyakit,
- γ= laju pemulihan.

Model ini digunakan untuk menghasilkan dataset perubahan jumlah individu pada setiap kelompok epidemi terhadap waktu.

Model Interaksi Spesies

Interaksi antarspesies tambahan dimodelkan menggunakan pendekatan kompetisi dan mutualisme.

Model kompetisi:

$$\frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \left(1 - \frac{N_1}{K_1} - \alpha \frac{N_2}{K_2}\right)$$

Model mutualisme:

$$\frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \left(1 - \frac{N_1}{K_1} + \alpha \frac{N_2}{K_2}\right)$$

dimana:

- N_1, N_2= populasi spesies,
- r_1= laju pertumbuhan,
- K_1, K_2= kapasitas lingkungan,
- α= koefisien interaksi.

Model ini digunakan untuk menggambarkan pengaruh hubungan antarspesies terhadap perubahan populasi.

Metode Penyelesaian Numerik

Seluruh persamaan diferensial diselesaikan menggunakan metode Runge-Kutta orde empat (RK4). Metode ini digunakan karena mampu memberikan pendekatan numerik yang baik untuk sistem ODE dengan perubahan variabel terhadap waktu dan banyak digunakan dalam simulasi sistem dinamik.

Secara umum, penyelesaian numerik dilakukan melalui:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{\Delta t}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7619

dimana:

- $y_n$merupakan nilai variabel pada waktu ke-n,
- Δtmerupakan interval waktu,
- k_1, k_2, k_3, k_4merupakan estimasi perubahan sistem pada setiap langkah.

Strategi Pembangkitan Dataset Sintetis

Dataset dibangkitkan melalui variasi parameter model secara terkontrol. Setiap kombinasi parameter menghasilkan satu lintasan dinamika populasi terhadap waktu.
Parameter simulasi ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Simulasi Dataset Sintetis

Model	Parameter	Rentang
Logistik	r	0,1–1
	K	500–5000
	N_0	10–500
Predator-mangsa	α	0,1–2
	β	0,001–0,1
	δ	0,001–0,1
	γ	0,1–1
SIR	β	0,1–1
	γ	0,05–0,5
	I_0	1–100

Struktur Dataset

Dataset hasil simulasi disusun dalam bentuk parameter-respons dengan variabel:

Tabel 2. Data set

Variabel	Keterangan
Model_ID	Jenis model dinamika
Time	Waktu simulasi
Parameter	Nilai parameter model
Population Variable	Variabel populasi
Population Value	Nilai populasi hasil simulasi

Dataset tersebut digunakan untuk menganalisis pola perubahan populasi berdasarkan variasi parameter sistem.

HASIL

Karakteristik Dataset Sintetis Model Dinamika Populasi

Simulasi numerik dilakukan untuk membangkitkan dataset sintetis berdasarkan beberapa model dinamika populasi, yaitu model pertumbuhan logistik, interaksi predator-mangsa, dan model epidemi SIR. Setiap model menghasilkan variabel respons yang berbeda sesuai dengan formulasi matematis dan parameter simulasi yang digunakan.

Dataset yang dihasilkan terdiri atas parameter model sebagai masukan dan nilai variabel populasi sebagai keluaran pada setiap langkah waktu simulasi. Model pertumbuhan logistik menghasilkan satu variabel populasi, model predator-mangsa menghasilkan dua variabel populasi yang terdiri atas mangsa dan predator, sedangkan model SIR menghasilkan tiga

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7619

variabel populasi yaitu kelompok rentan (*susceptible*), terinfeksi (*infected*), dan pulih (*recovered*).
Karakteristik umum dataset sintetis yang dihasilkan ditampilkan pada Tabel 3.

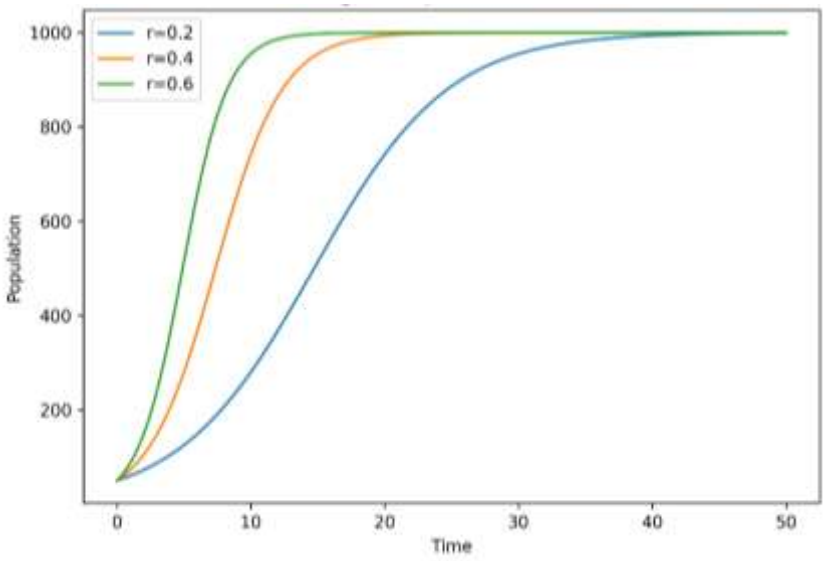
Tabel 3. Karakteristik Dataset Sintetis Dinamika Populasi

Model	Variabel Respons	Jumlah Titik Waktu	Jenis Dinamika
Pertumbuhan Logistik	Populasi (N)	200	Perubahan populasi terhadap waktu
Predator-Mangsa	Prey dan Predator	200	Perubahan dua populasi yang berinteraksi
SIR Epidemi	Susceptible, Infected, Recovered	400	Perubahan distribusi kelompok epidemi

Hasil pembangkitan dataset menunjukkan bahwa masing-masing model menghasilkan struktur data dengan jumlah variabel respons yang berbeda sesuai karakteristik sistem yang disimulasikan.

Simulasi Pertumbuhan Populasi Logistik

Hasil simulasi pertumbuhan populasi menggunakan model logistik ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Perubahan populasi terhadap waktu pada variasi laju pertumbuhan intrinsik model logistik.*

Simulasi dilakukan dengan variasi nilai laju pertumbuhan intrinsik (r) untuk mengamati perubahan jumlah populasi selama periode simulasi. Hasil simulasi menunjukkan perubahan nilai populasi dari kondisi awal menuju nilai yang relatif stabil pada akhir periode pengamatan. Perbedaan respons populasi pada setiap variasi parameter dirangkum berdasarkan nilai maksimum dan nilai akhir populasi pada Tabel 4.

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7619

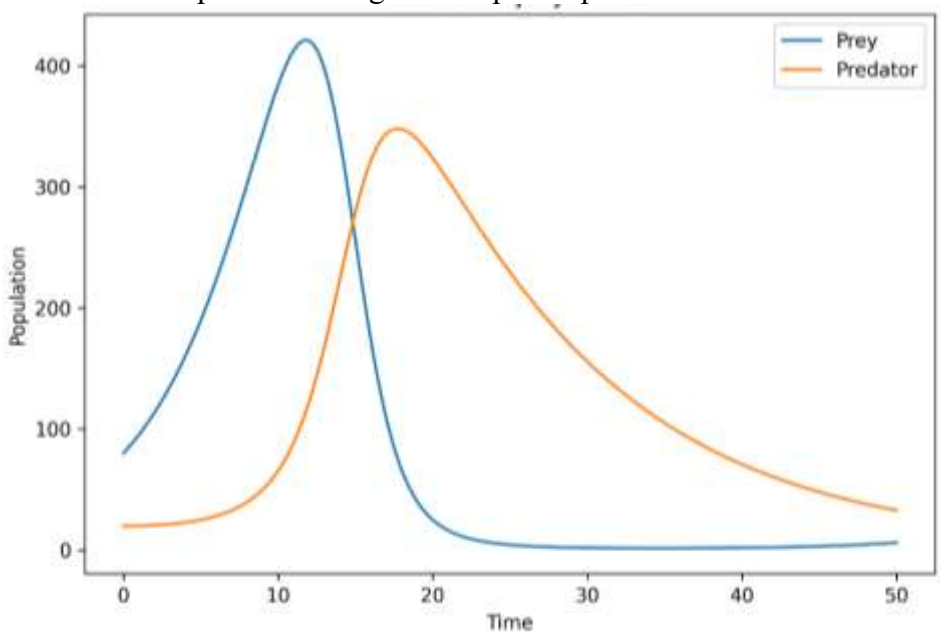
Tabel 4. Karakteristik Hasil Simulasi Model Pertumbuhan Logistik

Laju Pertumbuhan (r)	Populasi Maksimum	Waktu Simulasi Maksimum	Populasi Akhir
0,2	1000	50	999,14
0,4	1000	50	1000,00
0,6	1000	50	1000,00

Berdasarkan hasil simulasi, perubahan nilai parameter pertumbuhan menghasilkan perbedaan lintasan perubahan populasi selama waktu simulasi. Seluruh konfigurasi menghasilkan nilai populasi akhir yang mendekati batas maksimum populasi yang digunakan dalam model.

Simulasi Interaksi Predator-Mangsa

Hasil simulasi model predator-mangsa ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. *Perubahan populasi predator dan mangsa terhadap waktu pada model Lotka-Volterra.*

Simulasi menghasilkan perubahan dua variabel populasi secara bersamaan, yaitu populasi mangsa dan populasi predator. Nilai kedua populasi mengalami perubahan selama periode simulasi berdasarkan parameter interaksi yang digunakan.
Karakteristik rentang perubahan populasi predator dan mangsa ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Karakteristik Hasil Simulasi Predator-Mangsa

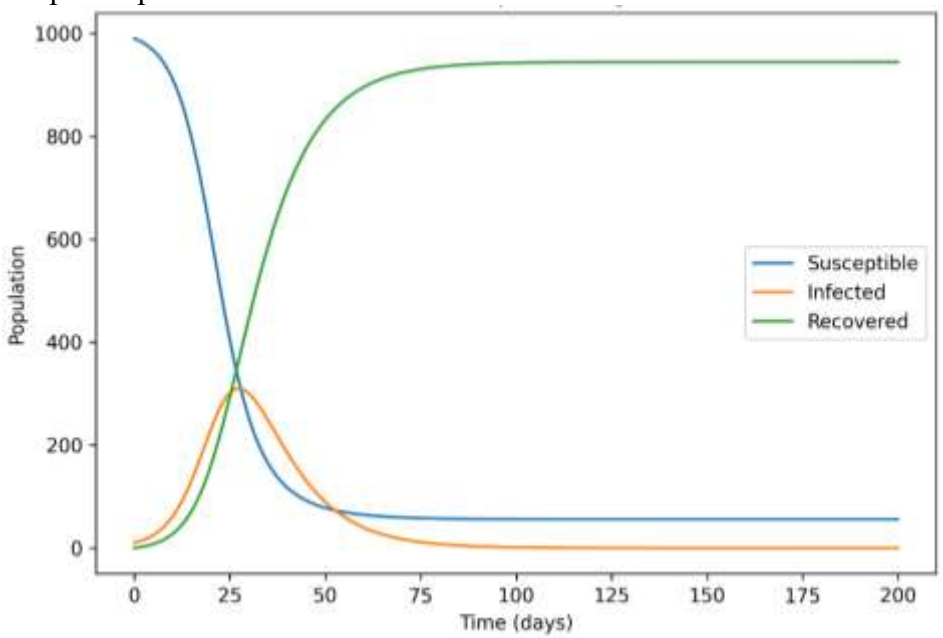
Parameter	Nilai
Populasi maksimum mangsa	421,40
Populasi minimum mangsa	1,52
Populasi maksimum predator	348,13
Populasi minimum predator	20,00

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7619

Hasil simulasi menghasilkan variasi nilai populasi pada kedua kelompok spesies selama periode pengamatan. Data yang diperoleh terdiri atas pasangan nilai populasi predator dan mangsa pada setiap waktu simulasi.

Simulasi Penyebaran Epidemi Model SIR

Simulasi model epidemi SIR dilakukan dengan periode pengamatan yang diperpanjang hingga 200 hari untuk memperoleh perubahan populasi pada seluruh kelompok epidemi. Hasil simulasi ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. *Perubahan populasi susceptible, infected, dan recovered pada simulasi model SIR.*

Hasil simulasi menunjukkan perubahan jumlah individu pada kelompok rentan, terinfeksi, dan pulih selama periode simulasi. Setiap kelompok populasi mengalami perubahan nilai sesuai dengan parameter transmisi dan pemulihan yang digunakan.
Karakteristik utama hasil simulasi SIR ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Karakteristik Hasil Simulasi Model SIR

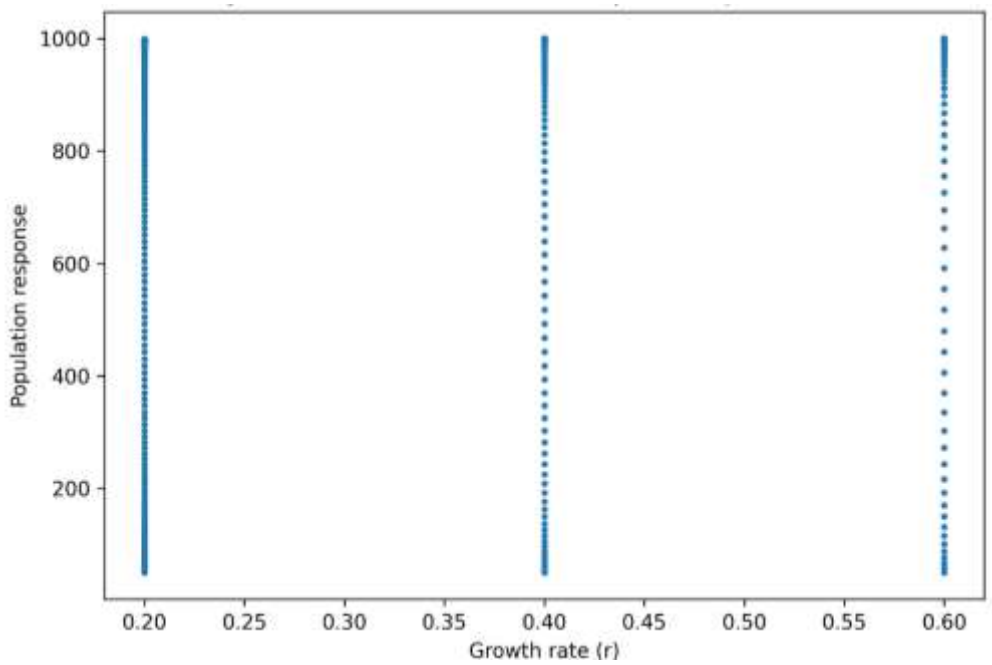
Parameter	Nilai
Populasi terinfeksi maksimum	309,71
Waktu mencapai populasi terinfeksi maksimum	27,57 hari
Populasi rentan akhir	55,73
Populasi pulih akhir	944,27

Hasil simulasi menunjukkan adanya perubahan distribusi populasi pada ketiga kelompok epidemi selama periode pengamatan.

Representasi Dataset Sintetis Multi-Model

Representasi hubungan antara parameter simulasi dan respons populasi ditampilkan pada Gambar 4.

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7619



Gambar 4. *Representasi dataset sintetis berbasis parameter dan respons dinamika populasi***.**

Visualisasi dataset menunjukkan bahwa setiap model menghasilkan pola respons yang berbeda sesuai dengan parameter dan struktur matematis yang digunakan. Dataset yang dibangkitkan terdiri atas informasi parameter simulasi serta perubahan variabel populasi pada setiap waktu pengamatan.

Berdasarkan hasil simulasi numerik, dataset sintetis berhasil dibangkitkan dari beberapa model dinamika populasi yang mencakup pertumbuhan logistik, interaksi predator-mangsa, dan penyebaran epidemi SIR. Masing-masing model menghasilkan keluaran populasi dengan karakteristik berbeda sesuai parameter simulasi yang digunakan. Dataset yang diperoleh berisi parameter model dan respons populasi terhadap waktu, sehingga dapat digunakan untuk mengamati karakteristik perubahan sistem pada setiap model dinamika populasi.

PEMBAHASAN

Pemodelan dinamika populasi telah lama digunakan sebagai pendekatan matematis untuk memahami perubahan sistem biologis yang dipengaruhi oleh pertumbuhan individu, keterbatasan sumber daya, interaksi antarspesies, maupun penyebaran penyakit. Keunggulan utama pendekatan ini terletak pada kemampuannya merepresentasikan mekanisme internal sistem melalui hubungan matematis antarvariabel (Murray, 2002; Edelstein-Keshet, 2005). Namun, perkembangan analisis berbasis data memberikan tantangan baru karena kebutuhan saat ini tidak hanya terbatas pada pemahaman mekanisme, tetapi juga membutuhkan dataset yang mampu merepresentasikan variasi sistem secara luas. Kondisi tersebut menimbulkan kesenjangan antara pendekatan berbasis model yang kaya interpretasi tetapi menghasilkan keluaran terbatas, dengan pendekatan berbasis data yang membutuhkan jumlah observasi besar tetapi tidak selalu mempertahankan mekanisme pembentuk data (Karniadakis et al., 2021; Willard et al., 2022).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa model dinamika populasi klasik dapat dimanfaatkan sebagai dasar pembangkitan dataset sintetis berbasis mekanisme. Pada model pertumbuhan logistik, perubahan populasi yang dihasilkan mengikuti karakteristik pertumbuhan dengan batas tertentu sesuai formulasi model. Model logistik yang pertama kali diperkenalkan oleh Verhulst telah menjadi dasar dalam berbagai kajian populasi karena mampu

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7619

menggambarkan kondisi ketika pertumbuhan awal mengalami pembatasan akibat keterbatasan sumber daya (Verhulst, 1838; May, 1976). Meskipun demikian, sebagian besar penelitian menggunakan model ini untuk mengevaluasi parameter pertumbuhan, kestabilan populasi, atau estimasi daya dukung lingkungan (Kot, 2001). Pendekatan dalam penelitian ini memperluas fungsi model tersebut dengan menjadikan variasi parameter sebagai dasar pembentukan dataset, sehingga keluaran model tidak hanya berupa satu lintasan pertumbuhan, tetapi kumpulan respons populasi berdasarkan kondisi simulasi yang berbeda.

Pada sistem dengan lebih dari satu spesies, dinamika populasi menjadi lebih kompleks karena perubahan satu populasi dapat memengaruhi populasi lainnya. Model Lotka-Volterra telah menjadi salah satu kerangka matematis utama dalam menjelaskan hubungan predator-mangsa melalui interaksi antarspesies (Lotka, 1925; Volterra, 1926). Berbagai pengembangan model tersebut menunjukkan bahwa dinamika ekologi dipengaruhi oleh hubungan kompetisi, predasi, dan ketergantungan antarspesies yang dapat menghasilkan pola perubahan populasi yang beragam (May, 1976; Hastings, 2010). Penelitian sebelumnya umumnya menggunakan model tersebut untuk menganalisis kestabilan ekosistem dan kondisi keberlangsungan populasi, sedangkan penelitian ini memanfaatkannya sebagai sumber pembentukan data sintetis. Dengan demikian, pola perubahan populasi yang dihasilkan tidak hanya diamati sebagai fenomena matematis, tetapi juga disusun sebagai struktur data yang menghubungkan parameter interaksi dengan respons sistem.

Pendekatan pembangkitan dataset sintetis juga memberikan perspektif baru pada penggunaan model epidemi. Model SIR yang dikembangkan oleh Kermack dan McKendrick telah menjadi dasar dalam pemodelan penyebaran penyakit melalui pembagian populasi menjadi kelompok rentan, terinfeksi, dan pulih (Kermack & McKendrick, 1927). Model ini kemudian berkembang menjadi berbagai variasi yang mempertimbangkan faktor tambahan seperti masa inkubasi, struktur populasi, maupun variasi kontak antarindividu (Hethcote, 2000; Keeling & Rohani, 2008). Walaupun demikian, sebagian besar penerapan model epidemi masih berfokus pada analisis satu skenario penyebaran atau evaluasi pengaruh parameter tertentu terhadap dinamika infeksi. Dalam penelitian ini, simulasi SIR digunakan untuk menghasilkan variasi respons populasi berdasarkan parameter model, sehingga menyediakan representasi data yang mempertahankan struktur matematis dari sistem epidemi yang disimulasikan.

Perbedaan mendasar penelitian ini dibandingkan pendekatan pemodelan konvensional terletak pada perubahan fungsi simulasi numerik. Pada pendekatan sebelumnya, simulasi umumnya digunakan untuk memperoleh solusi model dan memahami perilaku sistem pada kondisi tertentu. Sebaliknya, pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini memanfaatkan simulasi sebagai proses pembangkitan dataset sintetis dengan mempertahankan informasi mengenai parameter pembentuk sistem. Konsep ini sejalan dengan perkembangan *scientific machine learning*, dimana model berbasis pengetahuan dan pendekatan berbasis data mulai dikombinasikan untuk menghasilkan representasi sistem yang tetap mempertahankan informasi fisika maupun mekanisme yang mendasarinya (Raissi et al., 2019; Karniadakis et al., 2021).

Namun demikian, penggunaan dataset sintetis berbasis model matematis memiliki batasan yang perlu diperhatikan. Dataset yang dihasilkan sepenuhnya bergantung pada asumsi model, parameter awal, dan struktur persamaan diferensial yang digunakan. Berbeda dengan sistem biologis nyata yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan, variasi individu, struktur ruang populasi, serta perubahan kondisi eksternal, simulasi hanya merepresentasikan dinamika berdasarkan formulasi matematis tertentu (Murray, 2002; Otto & Day, 2007). Oleh karena itu, dataset sintetis pada penelitian ini tidak dimaksudkan untuk menggantikan data observasi, melainkan sebagai representasi numerik yang mempertahankan hubungan antara parameter model dan respons sistem.

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7619

Dalam konteks pengembangan analisis berbasis data, keberadaan dataset yang memiliki informasi mekanistik menjadi aspek penting karena tidak semua pola biologis dapat dipahami hanya melalui hubungan statistik antarvariabel. Pendekatan berbasis data murni dapat menghasilkan prediksi dengan performa tertentu, tetapi sering menghadapi tantangan interpretasi ketika diterapkan pada sistem kompleks (Brunton et al., 2020; Willard et al., 2022). Sebaliknya, dataset yang dibangkitkan melalui simulasi berbasis model memberikan informasi tambahan mengenai kondisi pembentuk data. Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan bahwa model dinamika populasi klasik dapat digunakan sebagai sumber pembentukan dataset sintetis yang mempertahankan karakteristik matematis sistem, sekaligus membuka peluang integrasi dengan pendekatan analisis berbasis data.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan dataset sintetis berbasis simulasi numerik dari beberapa model dinamika populasi yang mencakup pertumbuhan logistik, interaksi predator-mangsa, dan penyebaran epidemi model SIR. Hasil simulasi menunjukkan bahwa setiap model menghasilkan karakteristik perubahan populasi yang berbeda sesuai dengan parameter dan struktur matematis yang digunakan. Pendekatan pembangkitan dataset memungkinkan keluaran simulasi tidak hanya direpresentasikan sebagai perubahan populasi terhadap waktu, tetapi juga disusun bersama parameter pembentuk sistem. Dataset sintetis yang dihasilkan memberikan representasi numerik berbasis mekanisme yang mempertahankan karakteristik masing-masing model dinamika populasi. Meskipun masih dibatasi oleh asumsi matematis dan parameter simulasi, pendekatan ini menunjukkan potensi pemanfaatan model dinamika populasi sebagai sumber data terstruktur untuk mendukung analisis lanjutan berbasis simulasi maupun pendekatan berbasis data.

DAFTAR PUSTAKA

Brauer, F., Castillo-Chavez, C., & Feng, Z. (2019). *Mathematical models in epidemiology*. Springer.

Brunton, S. L., Noack, B. R., & Koumoutsakos, P. (2020). Machine learning for fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics, 52*, 477–508. https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010719-060214

Edelstein-Keshet, L. (2005). *Mathematical models in biology*. Society for Industrial and Applied Mathematics.

Hastings, A. (2010). *Population biology: Concepts and models*. Springer.

Hethcote, H. W. (2000). The mathematics of infectious diseases. *SIAM Review, 42*(4), 599–653. https://doi.org/10.1137/S0036144500371907

Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S., & Yang, L. (2021). Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics, 3*, 422–440. https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5

Keeling, M. J., & Rohani, P. (2008). *Modeling infectious diseases in humans and animals*. Princeton University Press.

Kermack, W. O., & McKendrick, A. G. (1927). A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 115*(772), 700–721. https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118

Kot, M. (2001). *Elements of mathematical ecology*. Cambridge University Press.

Lotka, A. J. (1925). *Elements of physical biology*. Williams & Wilkins.

May, R. M. (1976). *Theoretical ecology: Principles and applications*. W. B. Saunders.

Volume : 02 | Nomor 02 | Desember 2025 | E-ISSN : 3048-0787 | DOI: 10.47709/mda.v2i2.7619

Murray, J. D. (2002). *Mathematical biology I: An introduction* (3rd ed.). Springer.

Otto, S. P., & Day, T. (2007). *A biologist's guide to mathematical modeling in ecology and evolution*. Princeton University Press.

Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics, 378*, 686–707. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045

Strogatz, S. H. (2018). *Nonlinear dynamics and chaos: With applications to physics, biology, chemistry, and engineering* (2nd ed.). CRC Press.

Verhulst, P. F. (1838). Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement. *Correspondance Mathématique et Physique, 10*, 113–121.

Volterra, V. (1926). Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically. *Nature, 118*, 558–560. https://doi.org/10.1038/118558a0

Willard, J., Jia, X., Xu, S., Steinbach, M., & Kumar, V. (2022). Integrating physics-based modeling with machine learning: A survey. *ACM Computing Surveys, 55*(7), Article 147. https://doi.org/10.1145/3533378