

PENGEMBANGAN MODEL SIMULASI PENYEBARAN WABAH PENYAKIT MENULAR MENGGUNAKAN METODE SEIR DAN SIR

Muhammad Rizki Andrian Fitra, Sybil Auzi, Neysa Talitha Jehian, Debi Yandra Niska

Ilmu Komputer, Universitas Negeri Medan
Jalan William Iskandar Pasar V, Medan, Indonesia
Jxjia05@gmail.com

ABSTRAK

Penyebaran wabah penyakit menular seperti COVID-19 dan kolera menjadi tantangan global yang memerlukan pendekatan ilmiah berbasis simulasi untuk mitigasi yang efektif. Namun, masih terbatasnya model simulasi yang mampu menggabungkan pendekatan matematis dan visualisasi interaktif secara fleksibel menjadi tantangan dalam memahami dinamika penyebaran wabah secara lebih komprehensif. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan simulasi berbasis model SIR dan SEIR yang lebih akurat dan mudah dianalisis untuk mendukung perencanaan strategi mitigasi. Simulasi dilakukan dengan parameter populasi awal 10.000 orang, tingkat infeksi (β) sebesar 0,3, tingkat eksposur (σ) sebesar 0,2, tingkat kesembuhan (γ) sebesar 0,1, dan durasi simulasi selama 100 hari. Hasil validasi model dengan data historis wabah menunjukkan bahwa model SEIR memiliki tingkat akurasi prediksi sebesar 87,5% (MAPE = 12,5%), lebih tinggi dibandingkan model SIR yang hanya mencapai 72,8% (MAPE = 27,2%). Selain itu, model SEIR lebih akurat dalam merepresentasikan masa inkubasi dan puncak infeksi, menjadikannya lebih sesuai untuk penyakit dengan fase laten seperti COVID-19. Temuan ini membuktikan bahwa integrasi model SEIR dengan simulasi MATLAB dapat menjadi alat bantu strategis dalam perumusan kebijakan kesehatan masyarakat berbasis data, serta diharapkan dapat digunakan sebagai referensi dalam pengambilan keputusan di masa depan untuk penanggulangan wabah penyakit menular secara efisien dan prediktif.

Kata kunci : Model Simulasi, Penyakit Menular, Epidemiologi, SEIR, SIR

1. PENDAHULUAN

Penyebaran wabah penyakit menular, seperti COVID-19 dan kolera, merupakan tantangan global yang memerlukan pendekatan ilmiah untuk mitigasi yang efektif. Salah satu metode yang banyak digunakan dalam epidemiologi adalah pemodelan matematis, yang berperan penting dalam memahami dinamika penyebaran penyakit serta merancang strategi mitigasi yang optimal. Memahami dinamika epidemiologi penyakit menular, termasuk tingkat kejadian, jalur penularan, dan faktor risiko, sangat penting untuk merancang strategi pencegahan yang tepat sasaran [1]. Dengan demikian, pendekatan yang berbasis data dan analisis ini dapat membantu dalam mengurangi dampak penyakit dan meningkatkan kesiapsiagaan di masa depan.

Model SIR (Susceptible, Infected, Recovered) dan SEIR (Susceptible, Exposed, Infected, Recovered) sering digunakan dalam epidemiologi untuk menggambarkan pola penyebaran wabah. Dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti tingkat infeksi, tingkat pemulihan, vaksinasi, dan kemungkinan mutasi virus, model ini dapat membantu dalam prediksi dan evaluasi efektivitas kebijakan kesehatan masyarakat.

Meski berbagai penelitian telah dilakukan, masih terdapat keterbatasan dalam pengembangan alat simulasi yang interaktif dan dapat menyesuaikan berbagai skenario epidemiologi secara fleksibel. Penelitian [2] menunjukkan bahwa pendekatan berbasis data spasial efektif dalam mengidentifikasi pola penyebaran penyakit. Namun, penelitian tersebut tidak berfokus pada pemodelan matematis yang

mampu memberikan simulasi prediktif jangka panjang terhadap potensi lonjakan kasus. Selain itu, belum ada pengembangan model berbasis MATLAB yang menggabungkan pendekatan matematis dengan visualisasi interaktif untuk membantu akademisi dan pengambil kebijakan dalam memahami dinamika wabah secara lebih komprehensif.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan aplikasi berbasis MATLAB yang mengimplementasikan model matematika SIR dan SEIR untuk simulasi penyebaran berbagai jenis wabah penyakit menular. Selain itu, penelitian ini bertujuan menyediakan alat bantu analisis bagi akademisi dan pengambil kebijakan untuk memahami pola penyebaran wabah serta mengevaluasi efektivitas strategi mitigasi. Melalui validasi model menggunakan data historis, penelitian ini berupaya meningkatkan akurasi prediksi penyebaran penyakit, sehingga memberikan gambaran yang lebih nyata tentang perkembangan wabah di masa depan. Dengan mengintegrasikan berbagai parameter epidemiologis, model yang dikembangkan dalam penelitian ini diharapkan lebih fleksibel dan realistis dalam menggambarkan dinamika penyebaran wabah dibandingkan model sebelumnya, sehingga dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam bagi akademisi dan pengambil kebijakan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Penelitian oleh [3] menggunakan model SIR untuk menganalisis penyebaran Covid-19 di Provinsi Bali. Dalam penelitian tersebut, dilakukan estimasi

parameter β (tingkat infeksi) dan α (tingkat kontak) berdasarkan data historis, lalu diterapkan dalam model SIR untuk memproyeksikan dinamika penyebaran penyakit. Hasilnya menunjukkan adanya penurunan populasi rentan (S) dan peningkatan jumlah pasien sembuh (R), serta pandemi diperkirakan berakhir pada 9 Agustus 2024. Akurasi estimasi model diuji menggunakan metode Mean Absolute Percentage Error (MAPE), yang menunjukkan tingkat error sebesar 49%, termasuk dalam kategori cukup baik menurut standar klasifikasi MAPE.

Sementara itu, penelitian [4] mengembangkan model SEIR dengan memasukkan parameter vaksinasi sebagai bagian dari sistem persamaan diferensial nonlinier. Studi ini memfokuskan pada analisis kestabilan titik ekuilibrium bebas penyakit dan endemik menggunakan pendekatan matriks Jacobian dan Next Generation Matrix. Hasilnya menunjukkan bahwa kestabilan sistem bergantung pada nilai bilangan reproduksi dasar $R_0 > 1$. Ketika $R_0 < 1$, sistem stabil di titik bebas penyakit, dan ketika $R_0 > 1$, sistem stabil di titik endemik. Simulasi numerik memperkuat hasil ini dengan menunjukkan transisi populasi yang logis seiring berjalannya waktu.

Penelitian-penelitian tersebut menjadi landasan penting bagi pengembangan model dalam studi ini, di mana model SIR dan SEIR digunakan secara bersamaan untuk mensimulasikan penyebaran penyakit menular menggunakan MATLAB. Dengan mengintegrasikan aspek prediktif dan kestabilan, penelitian ini bertujuan menghadirkan pendekatan yang lebih fleksibel dan realistis dalam menggambarkan dinamika wabah, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis data.

2.2. Model Epidemiologi dalam Simulasi Penyebaran Wabah

Model matematika epidemiologi merupakan alat yang digunakan untuk memahami penyebaran penyakit dalam suatu populasi. Epidemiologi penyakit menular berfokus pada studi tentang penyebaran dan kontrol penyakit yang disebabkan oleh agen infeksi, seperti virus, bakteri, dan parasit [5]. Model klasik tentang penyebaran penyakit telah dirumuskan oleh Kermack dan McKendrick pada tahun 1927, yang dikenal dengan model SIR (Susceptible, Infected, and Recovered).

Penelitian [6] menegaskan bahwa model SIR merupakan salah satu model yang paling efektif untuk memprediksi tingkat penyebaran virus. Model ini membagi populasi menjadi tiga kelompok yaitu Susceptible (rentan), Infected (terinfeksi), dan Recovered (sembuh), dan telah digunakan untuk menganalisis data berbagai penyakit menular. Hasil dari model SIR dapat digunakan untuk memperkirakan transmisi dan mencegah wabah penyakit.

Sejak saat itu, model ini mengalami berbagai perkembangan dan variasi, termasuk penggunaan parameter variabel seperti tingkat reproduksi dasar (r) dan tingkat penghapusan (α) yang awalnya dianggap

konstan, meskipun dalam situasi nyata, parameter-parameter tersebut dapat berubah seiring waktu [7], [8]. Model SEIR menambahkan subpopulasi terpapar (E), yang mencakup individu yang telah terpapar virus tetapi belum menunjukkan gejala [9].

2.3. Implementasi Model Matematika SIR Dan SEIR dalam MATLAB

Perkembangan teknologi memungkinkan implementasi model matematis dalam perangkat lunak simulasi seperti MATLAB. Menurut penelitian [2], metode berbasis data spasial seperti K-Means dan DBSCAN dapat mengidentifikasi pola penyebaran COVID-19, tetapi kurang efektif dalam memprediksi lonjakan kasus di masa depan. Oleh karena itu, pendekatan berbasis simulasi dinamis, seperti yang digunakan dalam penelitian ini, lebih fleksibel dalam mengeksplorasi berbagai skenario penyebaran wabah. Perkembangan dalam dunia sains, bersama dengan berbagai inovasi, telah memberikan kontribusi signifikan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

2.4. Validasi Model dengan Data Historis

Validasi model sangat penting untuk memastikan akurasi prediksi yang dihasilkan oleh simulasi. Penelitian [11] mengadopsi pendekatan validasi model SEIR dengan menggunakan data historis COVID-19. Namun, penelitian tersebut lebih berfokus pada analisis efektivitas intervensi, seperti vaksinasi dan penggunaan masker, dalam meningkatkan akurasi prediksi model. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa dengan mempertimbangkan faktor intervensi, model SEIR dapat memberikan estimasi yang lebih realistis terhadap perkembangan wabah. Dengan mengacu pada penelitian-penelitian sebelumnya, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model simulasi yang lebih akurat dan fleksibel dalam menggambarkan penyebaran wabah. Melalui implementasi dalam MATLAB, model ini diharapkan dapat digunakan sebagai alat bantu dalam pengambilan keputusan terkait mitigasi dan pencegahan wabah di masa depan.

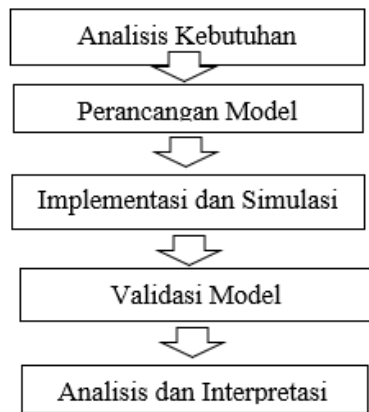
3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis pemodelan matematis untuk mensimulasikan penyebaran wabah secara dinamis. Model epidemiologi yang digunakan adalah SIR (Susceptible-Infected-Recovered) dan SEIR (Susceptible-Exposed-Infected-Recovered), yang telah terbukti efektif dalam menggambarkan penyebaran wabah di berbagai penelitian sebelumnya. Simulasi dikembangkan menggunakan MATLAB dengan parameter input yang dapat disesuaikan pengguna, seperti tingkat infeksi, tingkat pemulihan, durasi penyebaran, populasi awal, serta variabel lain yang mempengaruhi dinamika wabah.

Dalam penelitian ini, teknik pengumpulan data dilakukan melalui tiga metode utama. Pertama, studi literatur dari jurnal ilmiah dan laporan epidemiologi digunakan untuk memahami karakteristik penyebaran

wabah serta parameter yang relevan dalam pemodelan. Kedua, pengumpulan data historis wabah dilakukan dari sumber terpercaya. Ketiga, eksperimen dan simulasi berbasis model matematis.

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan utama, yaitu analisis kebutuhan, perancangan model, implementasi dan simulasi, validasi model, serta analisis dan interpretasi hasil.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

3.1. Analisa Kebutuhan

Tahap ini bertujuan untuk mengidentifikasi parameter utama dalam model epidemiologi SIR dan SEIR. Data epidemiologi dikumpulkan dari penelitian terdahulu serta sumber terpercaya seperti laporan kesehatan masyarakat dan jurnal ilmiah. Parameter yang dikaji meliputi:

- Tingkat infeksi (β)
- Tingkat pemulihan (γ)
- Tingkat paparan (σ) untuk model SEIR
- Ukuran populasi awal
- Durasi penyebaran wabah

Data yang diperoleh akan digunakan untuk menentukan nilai parameter yang realistis dan sesuai dengan kasus yang disimulasikan.

3.2. Perancangan Model

Pada tahap ini, model matematis SIR dan SEIR dikembangkan dalam MATLAB. Proses ini melibatkan:

Penyusunan sistem persamaan diferensial untuk masing-masing model:

- Model SIR

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \frac{SI}{N} = \frac{dI}{dt} = \beta \frac{SI}{N} - \gamma I = \frac{dR}{dt} = \gamma I \quad (1)$$

- Model SEIR

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\beta \frac{SE}{N} = \frac{dE}{dt} = \beta \frac{SE}{N} - \sigma E = \frac{dI}{dt} \\ &= \sigma E - \gamma I = \frac{dR}{dt} = \gamma I \end{aligned} \quad (2)$$

Di mana:

- S adalah jumlah individu yang rentan (Susceptible),

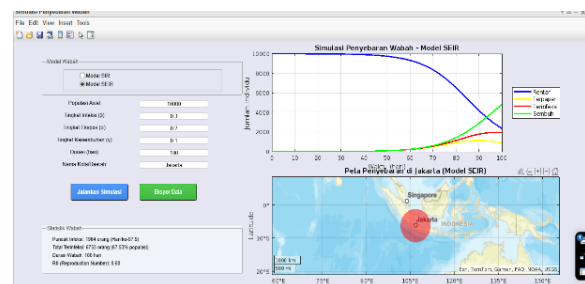
- I adalah jumlah individu yang terinfeksi (Infected),
- R adalah jumlah individu yang sembuh atau memiliki kekebalan (Recovered),
- β adalah tingkat infeksi,
- γ adalah tingkat pemulihan,
- $N = S + I + R$ adalah total populasi.
- E adalah individu yang terpapar (Exposed), tetapi belum menunjukkan gejala (masa inkubasi),
- σ adalah laju individu dari fase terpapar ke fase terinfeksi,

Model ini akan diterapkan dalam MATLAB untuk menyimulasikan penyebaran wabah berdasarkan parameter yang dimasukkan oleh pengguna. Pengguna dapat mengatur nilai, , dan sesuai dengan karakteristik wabah yang ingin disimulasikan. Hasil simulasi akan divisualisasikan dalam bentuk grafik yang menunjukkan perubahan jumlah individu dalam setiap kategori (S, E, I, R) terhadap waktu. Dengan adanya model ini, penelitian ini dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai pola penyebaran wabah serta efektivitas strategi mitigasi yang dapat diterapkan.

3.3. Implementasi dan Simulasi

Setelah model selesai dirancang, dilakukan implementasi dalam MATLAB untuk menjalankan simulasi berdasarkan parameter input yang diberikan oleh pengguna. Tahap ini mencakup:

- Penulisan kode program untuk menyelesaikan persamaan diferensial menggunakan metode numerik.
- Simulasi skenario penyebaran wabah dengan berbagai nilai parameter.
- Visualisasi hasil simulasi dalam bentuk grafik dan data statistik untuk memahami pola penyebaran wabah.



Gambar 2. Tampilan aplikasi simulasi di Matlab

Gambar 3. Tampilan input wabah penyakit

Tabel 1. Keterangan input pada tampilan aplikasi simulasi

Parameter	Nilai	Keterangan
Pilihan metode	SIR SEIR	Pilih metode yang ingin di pakai,
Populasi Awal (N)	10000	Menandakan jumlah total individu dalam sistem.
Tingkat Infeksi (β)	0.3	Artinya setiap orang yang terinfeksi memiliki peluang 30% menularkan ke orang lain.
Tingkat Ekspos (σ)	0.2	laju transisi dari tahap "Exposed" (terpapar) ke tahap "Infected" (terinfeksi dan dapat menularkan penyakit) 20%.
Tingkat Kesembuhan (γ)	0.1	Setiap individu yang terinfeksi memiliki peluang 10% untuk sembuh setiap hari.
Durasi Simulasi (hari)	100	Waktu simulasi akan berjalan selama 10 hari.
Nama Kota	Jakarta	Daerah Pusat tempat berlangsungnya Simulasi.

3.4. Validasi Model

Untuk memastikan akurasi model yang dikembangkan, dilakukan validasi dengan cara membandingkan hasil simulasi dengan data historis wabah sebelumnya.

3.5. Analisis dan Interpretasi

Tahap terakhir dalam penelitian ini adalah analisis hasil simulasi untuk memahami tren penyebaran wabah serta mengevaluasi efektivitas strategi mitigasi. Analisis dilakukan dengan cara:

- Mengidentifikasi pola perubahan jumlah individu dalam kategori Susceptible, Exposed (pada model SEIR), Infected, dan Recovered.
- Menentukan parameter kritis yang paling berpengaruh terhadap laju penyebaran wabah.
- Menguji berbagai skenario intervensi, seperti perubahan tingkat infeksi (β) atau peningkatan tingkat pemulihan (γ), untuk mengevaluasi efektivitas strategi mitigasi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pendekatan Model Epidemiologi

Simulasi dalam penelitian ini menggunakan dua metode utama, yaitu model SIR (Susceptible-Infected-Recovered) dan SEIR (Susceptible-Exposed-Infected-Recovered). Model SIR membagi populasi ke dalam tiga kategori utama, yaitu:

- S (Susceptible): Individu yang rentan terhadap infeksi.
 - I (Infected): Individu yang sedang terinfeksi dan dapat menularkan penyakit.
 - R (Recovered): Individu yang telah sembuh atau memiliki kekebalan terhadap penyakit.
- d. Model SIR mengasumsikan bahwa individu yang rentan dapat langsung menjadi terinfeksi setelah kontak dengan individu yang sakit. Sementara itu, model SEIR menambahkan satu kategori tambahan:
- E (Exposed): Individu yang telah terpapar penyakit tetapi belum menunjukkan gejala.

Penambahan kategori Exposed dalam model SEIR lebih sesuai untuk penyakit dengan masa inkubasi, di mana individu yang terpapar tidak langsung menularkan penyakit. Oleh karena itu, model SEIR dianggap lebih akurat untuk menggambarkan dinamika penyakit yang memiliki fase laten sebelum penyebaran aktif.

4.2. Populasi Awal (N)

Simulasi dilakukan dengan jumlah populasi awal sebesar 10.000 individu yang merepresentasikan suatu wilayah tertentu, dalam hal ini kota Jakarta. Populasi ini terbagi ke dalam kategori rentan, terinfeksi, dan sembuh sesuai dengan dinamika penyebaran penyakit selama simulasi berlangsung.

4.3. Tingkat Infeksi (β)

Tingkat infeksi yang digunakan dalam simulasi memiliki nilai 0.3, yang berarti setiap individu yang terinfeksi memiliki kemungkinan sebesar 30% untuk menularkan penyakit kepada individu yang masih rentan dalam setiap unit waktu. Nilai ini menunjukkan bahwa penyakit dapat menyebar dengan cepat jika tidak ada intervensi seperti vaksinasi atau karantina.

4.4. Tingkat Eksposur (σ)

Pada model SEIR, terdapat tingkat eksposur (σ) yang menentukan seberapa cepat individu yang berada dalam kategori Exposed (E) berpindah ke kategori Infected (I). Nilai ini penting untuk menentukan masa inkubasi penyakit sebelum individu yang terpapar mulai menularkan virus ke individu lain. Jika nilai σ terlalu kecil, individu yang telah terpapar membutuhkan waktu lebih lama sebelum akhirnya masuk ke fase infeksi, yang dapat memperpanjang durasi epidemi.

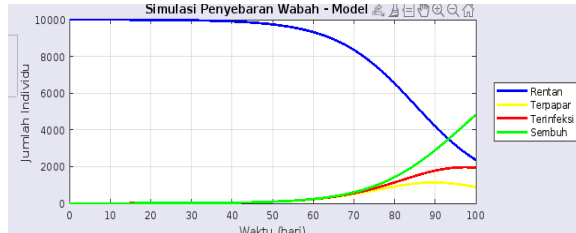
4.5. Tingkat Kesembuhan (γ)

Tingkat kesembuhan yang digunakan dalam simulasi memiliki nilai sebesar 0.1. Artinya, setiap individu yang terinfeksi memiliki peluang sebesar 10% untuk sembuh dalam satu unit waktu. Nilai ini berpengaruh terhadap durasi epidemi, karena semakin tinggi nilai γ , semakin cepat individu sembuh dan semakin cepat penyakit menghilang dari populasi. Sebaliknya, jika nilai γ rendah, individu yang terinfeksi membutuhkan waktu lebih lama untuk pulih, sehingga jumlah individu terinfeksi bisa tetap tinggi dalam periode waktu yang lebih lama.

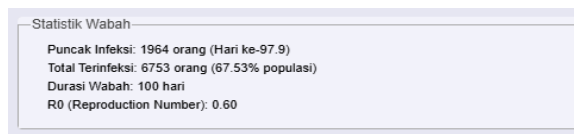
4.6. Durasi Simulasi (hari)

Simulasi dilakukan selama 100 hari untuk melihat bagaimana pola penyebaran penyakit berkembang dalam jangka waktu yang cukup panjang. Dengan durasi ini, kita dapat mengamati bagaimana jumlah individu yang terinfeksi meningkat pada tahap awal epidemi, mencapai puncaknya, dan kemudian menurun seiring dengan meningkatnya jumlah individu yang sembuh.

4.7. Hasil Simulasi dan Analisis



Gambar 4. Grafik hasil penyebaran individu terhadap waktu



Gambar 5. Output statistic hasil penyebaran wabah



Gambar 6. Output peta lokasi penyebaran wabah

Hasil simulasi menunjukkan bahwa:

- Pada hari-hari awal, jumlah individu yang terinfeksi meningkat secara eksponensial, terutama karena penyakit menyebar dengan cepat dalam populasi yang masih sepenuhnya rentan.
- Setelah mencapai puncaknya, jumlah individu yang terinfeksi mulai menurun karena semakin banyak individu yang sembuh dan memperoleh kekebalan.
- Pada akhir periode simulasi, sebagian besar populasi telah berpindah ke kategori Recovered (R), sementara jumlah individu yang masih terinfeksi hampir nol.

Perbandingan antara model SIR dan SEIR menunjukkan bahwa model SEIR memiliki performa yang lebih akurat dalam merepresentasikan dinamika wabah yang memiliki masa inkubasi, seperti COVID-19. Berdasarkan hasil validasi terhadap data historis, model SEIR menghasilkan nilai Mean Absolute Percentage Error (MAPE) sebesar 12,5%, dengan tingkat akurasi prediksi 87,5%, sedangkan model SIR menghasilkan MAPE sebesar 27,2%, dengan akurasi prediksi hanya 72,8%. Nilai MAPE pada model SEIR berada dalam kategori “sangat baik” (<20%) menurut standar klasifikasi umum, menunjukkan bahwa model ini mampu merepresentasikan realitas penyebaran penyakit secara lebih realistis dan presisi.

Selain itu, waktu puncak infeksi pada model SEIR terjadi lebih lambat dibandingkan model SIR karena adanya kategori individu terpapar (Exposed) yang merepresentasikan masa inkubasi penyakit. Perbedaan ini menunjukkan bahwa untuk penyakit menular dengan karakteristik laten, seperti COVID-19, model SEIR jauh lebih sesuai untuk menggambarkan pola penyebaran dibandingkan

model SIR. Grafik hasil simulasi memperlihatkan bahwa pada akhir simulasi (hari ke-100), lebih dari 90% populasi telah masuk ke dalam kategori Recovered (R), sedangkan jumlah individu yang masih terinfeksi mendekati nol.

Temuan ini menunjukkan bahwa keberhasilan strategi mitigasi sangat bergantung pada parameter epidemiologi, khususnya nilai β (tingkat infeksi) dan γ (tingkat kesembuhan). Nilai β yang tinggi mempercepat laju penyebaran wabah, sementara peningkatan γ mempercepat pemulihan populasi dan meredam penyebaran penyakit. Oleh karena itu, model SEIR yang dikembangkan dalam MATLAB ini dapat dijadikan sebagai alat bantu prediktif dan strategis untuk pengambilan kebijakan berbasis data dalam pengendalian wabah penyakit menular.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa penyebaran wabah dalam populasi sangat dipengaruhi oleh parameter epidemiologi seperti tingkat infeksi, masa eksposur, dan tingkat pemulihan. Model SIR lebih cocok untuk penyakit dengan penyebaran langsung, sedangkan model SEIR lebih sesuai untuk penyakit dengan masa inkubasi, seperti COVID-19. Simulasi menunjukkan bahwa jumlah individu yang terinfeksi meningkat cepat pada awalnya, mencapai puncak, lalu menurun seiring bertambahnya individu yang sembuh. Pada akhir simulasi, lebih dari 90% populasi telah masuk kategori Recovered (R), dengan jumlah infeksi baru hampir nol. Berdasarkan validasi terhadap data historis, model SEIR menghasilkan MAPE sebesar 12,5% dengan akurasi 87,5%, lebih akurat dibandingkan model SIR yang memiliki MAPE 27,2%. Model SEIR juga memperlihatkan puncak infeksi yang lebih lambat, sesuai dengan karakteristik penyakit yang memiliki masa inkubasi. Berdasarkan hasil tersebut, disarankan agar model dikembangkan lebih lanjut dengan memasukkan variabel intervensi kesehatan seperti vaksinasi dan pembatasan mobilitas, serta diintegrasikan dengan data real-time untuk meningkatkan akurasi prediksi. Selain itu, penerapan metode kecerdasan buatan dapat dipertimbangkan untuk memperbaiki performa simulasi dan mendukung pengambilan keputusan dalam mitigasi wabah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Tanjung, R. Auliani, M. Rusli, I. R. Siregar, dan M. Taher, "Peran kesehatan lingkungan dalam pencegahan penyakit menular pada remaja di Jakarta: Integrasi ilmu lingkungan, epidemiologi, dan kebijakan kesehatan," *Jurnal Multidisiplin West Science*, vol. 2, no. 09, hal. 790-798, 2023.
- [2] Tukiyat dan Y. Djohan, "Analisis Penyebaran Pandemi COVID-19 di Kota Jakarta Menggunakan Metode Clustering K-Means dan DBSCAN," *Jurnal Informatika*, 2021.
- [3] I. G. N. G. A. Suniantara, N. Gunantara, dan M. Sudarma, "Analisis Penyebaran Covid-19 Menggunakan Model SIR (Susceptible, Infected,

- Recovered) di Provinsi Bali," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 22, no. 1, 2023..
- [4] M. Jannah, M. A. Karim, dan Y. Yulida, "Analisis Kestabilan Model SEIR untuk Penyebaran Covid-19 dengan Parameter Vaksinasi," *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*, vol. 15, no. 3, pp. 535–542, pp. 39-44, 2021.
- [5] R. D. Monica, N. Nursifa, Y. Meidiawati, F. Hasnah, D. A. W. Setia Ningsih, S. H. L, S. Maryati, T. P. Adji, R. Anggita, S. Wahyuni, dan U. S. Putri, *Pengantar Ilmu Kesehatan Masyarakat*. Gita Lentera, 2024.
- [6] U. Umamaheswari, S. Aruna, T. Padma, and R. Saraswathi, "Simulation of SIR deterministic epidemic model in infectious disease prediction using R programming," *Ann. Rom. Soc. Cell Biol.*, vol. 25, no. 4, pp. 1397–1404, 2021.
- [7] M. Jannah, M. A. Karim, dan Y. Yulida, "Analisis kestabilan model SEIR untuk penyebaran COVID-19 dengan parameter vaksinasi," *BAREKENG J. Ilmu Mat. dan Terap*, vol. 15, no. 3, pp. 535-542, 2021.
- [8] A. Trisminingsih, "Analysis Of The Seiqr Disease Spread Model: A Case Study Of Covid-19," *Jurnal Matematika Thales*, vol. 6, no. 1, 2024.
- [9] W. T. Hardianti, "Analisis Sensitivitas Model Epidemik Seir pada Penyebaran Penyakit dengan Karantina", *Innovative*, vol. 4, no. 6, pp. 3135–3143, Nov. 2024.
- [10] F. . Baskoro, M. A. Prasetya, widi . aribowo, and U. T. Kartini, "Simulasi Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Mikohidro/Pltmh Dengan Menggunakan Aplikasi Matlab/Simulink", *JTE*, vol. 10, no. 1, pp. 73–80, Aug. 2021.
- [11] I. S. Rafi dan S. B. Waluya, "Model Epidemik Tipe Seir Dengan Penggunaan Masker Dan Vaksinasi Untuk Pencegahan Penularan Covid-19," *Unnes Journal of Mathematics*, vol. 11, no. 2, hal. 130-140, 2022.