

Strategi Kontrol Optimal pada Model Dinamika Penyebaran Cacar Monyet (*Monkeypox*)

Dewi Suhika

Institut Teknologi Sumatera

email: dewi.suhika@ma.itera.ac.id

Received 10 Desember 2024, Accepted 19 Maret 2025, Published 31 Maret 2025

Abstrak

Penyakit *monkeypox* merupakan penyakit menular yang membutuhkan perhatian serius karena tingkat penyebarannya yang cepat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika penyebaran penyakit *monkeypox* menggunakan model epidemiologi SEIR dan merancang strategi kontrol optimal untuk mengurangi jumlah infeksi serta biaya pengendalian. Strategi kontrol yang diterapkan mencakup karantina dan kampanye kesehatan, yang dirancang menggunakan pendekatan prinsip maksimum Pontryagin. Simulasi numerik dilakukan untuk membandingkan skenario tanpa kontrol dan dengan kontrol optimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa strategi kontrol optimal efektif dalam menekan jumlah individu yang terpapar dan terinfeksi. Pada skenario tanpa kontrol, jumlah total infeksi mencapai 26.481 individu, sedangkan dengan kontrol optimal infeksi dapat ditekan hingga 267 individu, menunjukkan penurunan sebesar 99,29%. Selain itu, kontrol optimal memperlambat penyebaran penyakit, memberikan waktu lebih lama untuk intervensi tambahan seperti vaksinasi atau pengobatan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa strategi kontrol optimal berbasis model matematis merupakan pendekatan yang efektif dan efisien dalam mengendalikan penyebaran penyakit *monkeypox*. Pendekatan ini dapat menjadi panduan penting bagi pengembangan kebijakan pengendalian penyakit menular di masa depan.

Kata Kunci: cacar monyet; kontrol optimal; SEIR.

Abstract

Monkeypox is an infectious disease that requires serious attention due to its rapid rate of spread. This study aims to analyze the dynamics of monkeypox transmission using the SEIR epidemiological model and to design an optimal control strategy to reduce the number of infections and control costs. The implemented control strategies include quarantine and health campaigns, which were designed using the Pontryagin maximum principle approach. Numerical simulations were conducted to compare scenarios without control and with optimal control. The results show that the optimal control strategy is effective in reducing the number of exposed and infected individuals. In the scenario without control, the total number of infections reached 26,481 individuals, whereas, with optimal control, infections were reduced to 267 individuals, demonstrating a reduction of 99.29%. Additionally, optimal control slowed the spread of the disease, allowing more time for additional interventions such as vaccination or treatment. This study concludes that optimal control strategies based on mathematical models are an effective and efficient approach to controlling the spread of monkeypox. This approach can serve as a valuable guide for developing policies to control infectious diseases in the future.

Keywords: *monkeypox*; optimal control; SEIR.

✉ Corresponding author

PENDAHULUAN

Monkeypox atau cacar monyet adalah penyakit zoonosis langka yang disebabkan oleh virus *monkeypox* (MPXV), anggota genus Orthopoxvirus yang juga mencakup virus variola penyebab cacar [1]. Penyakit ini pertama kali ditemukan pada tahun 1958 ketika dua wabah yang mirip cacar terjadi pada koloni monyet yang dipelihara untuk penelitian, sehingga dinamakan *monkeypox*. Kasus pertama pada manusia tercatat di Republik Demokratik Kongo pada tahun 1970 [2]. Sejak itu, *monkeypox* telah menjadi endemik di beberapa negara Afrika Tengah dan Barat, terutama di daerah dengan interaksi yang tinggi antara manusia dan hewan liar, khususnya hewan pengerat yang berfungsi sebagai reservoir alami virus ini [3].

Dalam beberapa tahun terakhir, *monkeypox* telah menjadi perhatian global karena laporan wabah yang meningkat di luar Afrika [4]. Pada Mei 2022, *monkeypox* mulai menyebar dengan cepat di berbagai negara di seluruh dunia, bahkan mencapai benua Amerika, Eropa, dan Asia [5]. Hingga saat ini, lebih dari 15.000 kasus telah dilaporkan, dengan penularan yang semakin meningkat di luar Afrika [6]. Penyebaran penyakit ini tidak hanya terjadi melalui kontak langsung antara manusia dan hewan yang terinfeksi, tetapi juga melalui kontak erat antar manusia [7]. *Monkeypox* memiliki gejala klinis yang mirip dengan cacar, tetapi biasanya dengan tingkat keparahan yang lebih ringan. Namun, dengan tingkat kematian yang mencapai 1-10% di daerah endemik, penyakit ini tetap menjadi ancaman serius, terutama di daerah dengan akses terbatas ke layanan kesehatan [8].

Pemodelan matematika epidemiologi memainkan peran penting dalam memahami dinamika penyebaran penyakit menular, termasuk *monkeypox* [8]. Dengan model matematika, kita dapat mengevaluasi berbagai faktor yang mempengaruhi laju transmisi penyakit, termasuk pola interaksi manusia dan hewan, tingkat imunitas populasi, dan efektivitas langkah-langkah pengendalian yang diterapkan. Model ini membantu peneliti dan pembuat kebijakan untuk memproyeksikan perkembangan wabah, menilai risiko, serta merancang dan mengoptimalkan strategi pengendalian [9]. Dalam konteks *monkeypox*, model yang menggabungkan interaksi manusia-hewan dan manusia-manusia diperlukan untuk memahami pola penyebaran penyakit ini secara komprehensif dan mengembangkan langkah-langkah pengendalian yang efektif.

Kontrol optimal merupakan pendekatan matematika yang digunakan untuk menentukan strategi pengendalian terbaik dalam suatu sistem dinamis, dengan mempertimbangkan keterbatasan sumber daya dan tujuan tertentu, seperti meminimalkan jumlah kasus infeksi atau mengurangi biaya pengendalian [10]. Dalam konteks epidemiologi, kontrol optimal diterapkan untuk mengidentifikasi kebijakan pengendalian penyakit yang paling efektif, misalnya dengan mengoptimalkan langkah-langkah seperti karantina, vaksinasi, dan kampanye kesehatan. Dengan menggunakan prinsip maksimum Pontryagin, kontrol optimal memungkinkan perumusan strategi pengendalian yang memenuhi tujuan epidemiologi dan ekonomi, seperti mengurangi penyebaran penyakit sambil mengoptimalkan penggunaan sumber daya [11].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menerapkan strategi kontrol optimal pada model penyebaran penyakit *monkeypox* yang berbasis model SEIR (*Susceptible-Exposed-Infected-Recovered*). Model ini melibatkan dua variabel

kontrol utama, yaitu karantina bagi individu yang terpapar (*exposed*) untuk mencegah mereka memasuki fase infeksi, dan kampanye kesehatan untuk mengurangi kontak antara individu rentan (*susceptible*) dan individu terinfeksi. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi dampak dari langkah-langkah pengendalian terhadap laju penyebaran penyakit dan jumlah individu yang terinfeksi serta pulih dalam populasi.

Struktur penelitian ini mencakup tiga bagian utama. Pertama, model SEIR digunakan untuk memodelkan penyebaran penyakit *monkeypox*, dengan parameter utama seperti laju transmisi dan pemulihan. Kedua, desain kontrol optimal dikembangkan menggunakan prinsip maksimum Pontryagin untuk menentukan strategi karantina dan kampanye kesehatan yang efektif dalam menekan infeksi. Ketiga, simulasi numerik dilakukan untuk membandingkan skenario dengan dan tanpa kontrol optimal, menggunakan metode Runge-Kutta untuk mengevaluasi efektivitas kontrol dalam menurunkan jumlah infeksi dan meningkatkan pemulihan.

METODOLOGI

Penelitian ini dimulai dengan mengkonstruksi model SEIR (*Susceptible-Exposed-Infected-Recovered*) untuk *monkeypox*, di mana setiap kompartemen mewakili tahap infeksi dalam populasi. Model ini dirancang dengan mempertimbangkan laju transmisi, masa inkubasi, laju pemulihan, dan faktor-faktor penentu lainnya yang mencerminkan dinamika penyebaran *monkeypox*.

Data parameter diperoleh dari kajian literatur yang mencakup studi terdahulu mengenai penyakit *monkeypox* dan parameter epidemiologi pada model SEIR. Tidak ada data empiris yang dikumpulkan secara langsung dari lapangan karena penelitian ini berbasis simulasi. Data parameter epidemiologis seperti laju transmisi, laju pemulihan, dan laju inkubasi diambil dari literatur terkait dan disesuaikan dengan karakteristik *monkeypox* [12], [13], [14].

Setelah model dasar terbentuk, penelitian ini menggunakan prinsip maksimum Pontryagin untuk menemukan nilai optimal dari variabel kontrol, yang meminimalkan jumlah infeksi dan biaya pengendalian. Prinsip maksimum Pontryagin menghasilkan persamaan *costate* yang menggambarkan perubahan nilai bayangan atau shadow prices dari setiap kompartemen [15]. Persamaan untuk variabel *costate* ini kemudian diselesaikan bersama persamaan state untuk mendapatkan solusi kontrol optimal. Karena kompleksitas persamaan diferensial yang melibatkan state dan *costate*, penelitian ini menggunakan metode Runge-Kutta *forward-backward sweep* untuk menyelesaikan persamaan secara numerik [13]. Metode ini melibatkan langkah maju (*forward*) untuk menyelesaikan persamaan state dari $t = 0$ hingga $t = T$ dan langkah mundur (*backward*) untuk menyelesaikan persamaan *costate* dari $t = T$ kembali ke $t = 0$. Proses ini diulang hingga konvergensi diperoleh, sehingga nilai optimal dapat ditemukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Formulasi Model Penyebaran *Monkeypox*

Dalam mengkonstruksi model matematika penyebaran *monkeypox*, langkah awal adalah menetapkan asumsi-asumsi dasar. Beberapa asumsi yang diterapkan dalam model SEIR untuk *monkeypox* ini adalah

1. Semua individu dalam populasi memiliki risiko yang sama untuk tertular penyakit.
2. Penyebaran *monkeypox* hanya melalui kontak langsung antara individu yang rentan (S) dan individu yang terinfeksi (I), tanpa mempertimbangkan sumber penularan hewan.
3. Variabel kontrol karantina (u_1) dan kampanye kesehatan (u_2) diasumsikan mampu mempengaruhi laju transmisi secara langsung sesuai dengan nilai optimal yang diperoleh.

Populasi dalam penelitian ini dibagi menjadi empat kompartemen, yang dapat dilihat pada Tabel 1 dan pendefinisian parameter pada Tabel 2.

Tabel 1. Pendefinisian kompartemen pada model *monkeypox*

Kompartemen	Definisi	Satuan
$S(t)$	Jumlah individu rentan (<i>susceptible</i>) pada waktu t	Orang
$E(t)$	Jumlah individu terpapar (<i>exposed</i>) pada waktu t	Orang
$I(t)$	Jumlah individu terinfeksi (<i>infected</i>) pada waktu t	Orang
$R(t)$	Jumlah individu sembuh (<i>recovered</i>) pada waktu t	Orang

Tabel 2. Pendefinisian parameter pada model *monkeypox*

Parameter	Definisi	Nilai	Sumber
β	Laju transmisi infeksi	0,052466	[12]
σ	Laju perubahan dari E ke I	0,08	[14]
γ	Laju pemulihan	0,036	[13]

Model SEIR untuk penyebaran *monkeypox* dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= -\beta SI - u_2 S \\
 \frac{dE}{dt} &= \beta SI - \sigma E - u_1 E \\
 \frac{dI}{dt} &= \sigma E - \gamma I - u_1 I \\
 \frac{dR}{dt} &= \gamma I + u_1 E + u_1 I + u_2 S
 \end{aligned} \tag{1}$$

Model pada persamaan (1) memanfaatkan dua variabel kontrol, u_1 dan u_2 , untuk mengendalikan penyebaran penyakit *monkeypox*. Kontrol u_1 merepresentasikan tingkat karantina pada individu yang terpapar atau terinfeksi, yang menurunkan transisi dari $E \rightarrow I$ dan mempercepat transisi $I \rightarrow R$. Sementara itu, u_2 berperan dalam kampanye kesehatan, yang mengurangi kontak antara individu rentan (S) dan terinfeksi (I), sehingga menurunkan laju infeksi. Berdasarkan hasil kontruksi model persamaan (1) beserta asumsi-asumsinya, penelitian ini berupaya untuk memahami dinamika penyebaran *monkeypox*. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi efektivitas strategi kontrol yang diterapkan melalui karantina dan kampanye kesehatan dalam mengurangi jumlah total infeksi di masyarakat.

Bilangan Reproduksi Dasar

Titik kesetimbangan bebas penyakit akan ditentukan terlebih dahulu sebelum menentukan bilangan reproduksi dasar, R_0 . Dalam model SEIR, titik kesetimbangan

bebas penyakit adalah keadaan di mana tidak ada individu yang terpapar ($E = 0$) atau terinfeksi ($I = 0$). Pada titik kesetimbangan bebas penyakit, populasi hanya terdiri dari individu S dan R dalam jangka panjang. Dengan asumsi populasi tetap yaitu, $N = S + E + I + R$, maka pada kondisi bebas penyakit, diperoleh $S = N$ dan $R = 0$. Oleh karena itu diperoleh titik kesetimbangan bebas penyakit untuk model (1) adalah sebagai berikut

$$(S, E, I, R) = (N, 0, 0, 0)$$

Setelah menentukan titik kesetimbangan bebas penyakit, selanjutnya dengan menggunakan *Next Generation Matrix* (NGM) dapat dihitung R_0 sebagai berikut:

1. Menentukan matriks infeksi F .

Matriks F merepresentasikan laju individu baru yang masuk ke dalam kompartemen yang dapat menularkan penyakit, yaitu kompartemen E dan I , akibat kontak dengan individu yang telah terinfeksi. Matriks ini dituliskan sebagai berikut

$$F = \begin{pmatrix} \beta S & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

2. Menentukan matriks transisi V .

Matriks V merepresentasikan laju individu yang berpindah keluar dari kompartemen yang terinfeksi akibat transisi alami dalam model, seperti perkembangan penyakit dari E ke I dan pemulihan dari infeksi. Bentuk matriks transisi diberikan sebagai berikut

$$V = \begin{pmatrix} \sigma & 0 \\ -\sigma & \gamma \end{pmatrix}$$

3. Hitung NGM $K = FV^{-1}$, dengan

$$V^{-1} = \begin{pmatrix} 1/\sigma & 0 \\ \sigma/\gamma & 1/\gamma \end{pmatrix}$$

sehingga

$$K = \begin{pmatrix} \beta S & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/\sigma & 0 \\ \sigma/\gamma & 1/\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta S/\sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

R_0 didefinisikan sebagai nilai eigen terbesar dari K , sehingga diperoleh

$$R_0 = \frac{\beta N}{\sigma}$$

Nilai R_0 memberikan informasi tentang efektivitas langkah-langkah pengendalian yang diperlukan. Untuk mencegah penyebaran penyakit secara luas, tujuan utama dari intervensi pengendalian, seperti karantina, kampanye kesehatan, atau vaksinasi, adalah untuk menurunkan R_0 hingga di bawah 1. Jika nilai R_0 bisa dikurangi menjadi kurang dari 1 melalui intervensi yang tepat, maka penyebaran penyakit akan berhenti.

Hasil Perancangan Kontrol Optimal Pada Model Monkeypox

Tujuan dari kontrol optimal adalah untuk mengurangi jumlah infeksi dan biaya pengendalian. Fungsi objektifnya dapat dituliskan sebagai

$$G = \int_0^T \left(C_1 I + \frac{1}{2} C_{u_1} u_1^2 + \frac{1}{2} C_{u_2} u_2^2 \right) dt \quad (2)$$

dengan C_1 merupakan biaya per unit waktu dari individu yang terinfeksi, C_{u_1} merupakan koefisien biaya untuk kontrol u_1 , C_{u_2} merupakan koefisien biaya untuk kontrol u_2 , dan T adalah durasi waktu yang dipertimbangkan dalam optimasi.

Diketahui fungsi Hamiltonian H , yang menggabungkan fungsi objektif dengan persamaan state melalui variabel costate $(\lambda_S, \lambda_E, \lambda_I, \lambda_R)$, yaitu

$$H = C_1 I + \frac{1}{2} C_{u_1} u_1^2 + \frac{1}{2} C_{u_2} u_2^2 + \lambda_S (-\beta SI - u_2 S) + \lambda_E (\beta SI - \sigma E - u_1 E) + \lambda_I (\sigma E - \gamma I - u_1 I) + \lambda_R (\gamma I + u_1 E + u_1 I + u_2 S) \quad (3)$$

Teorema 1. Pandang model sistem (1) dengan variabel kontrol u_1 dan u_2 serta fungsi costate $\lambda_S, \lambda_E, \lambda_I$, dan λ_R yang memenuhi persamaan berikut

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda_S}{dt} &= \lambda_S \beta I - \lambda_E \beta I + \lambda_R u_2 \\ \frac{d\lambda_E}{dt} &= \lambda_E \sigma - \lambda_I \sigma + \lambda_R u_1 \\ \frac{d\lambda_I}{dt} &= -C_1 + \lambda_S (-\beta S) + \lambda_E \beta S + \lambda_I \gamma + \lambda_R (-\gamma - u_1) \\ \frac{d\lambda_R}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

maka solusi optimal untuk u_1 dan u_2 yang meminimalkan fungsi objektif diberikan oleh

$$u_1^* = \frac{\lambda_E E + \lambda_I I - \lambda_R (E + I)}{C_{u_1}}$$

$$u_2^* = \frac{\lambda_S S - \lambda_R S}{C_{u_2}}$$

Setelah diperoleh solusi kontrol optimal u_1^* dan u_2^* berdasarkan Teorema 1 dan melalui penerapan prinsip maksimum Pontryagin, langkah selanjutnya adalah mengimplementasikan nilai kontrol tersebut ke dalam simulasi numerik model SEIR. Solusi u_1^* dan u_2^* berfungsi untuk meminimalkan jumlah individu yang terinfeksi serta biaya pengendalian selama periode tertentu.

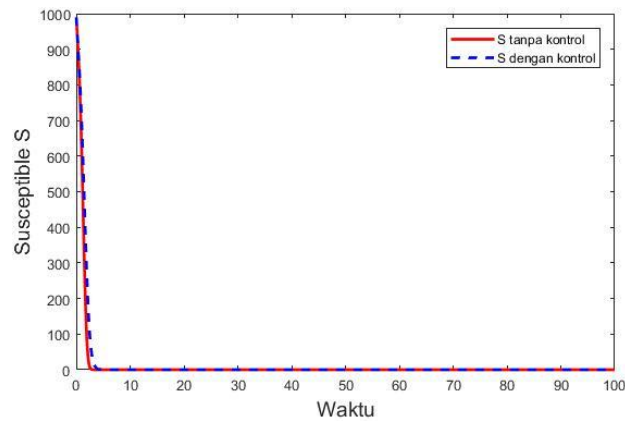
Simulasi Hasil Perancangan Kontrol Optimal

Simulasi dilakukan untuk menganalisis dinamika penyebaran penyakit *monkeypox* menggunakan model SEIR persamaan (1) dengan dan tanpa penerapan kontrol optimal. Tujuan utama adalah untuk mengevaluasi efektivitas strategi kontrol berupa karantina (u_1) dan kampanye kesehatan (u_2) dalam mengurangi jumlah individu yang terpapar (E) dan terinfeksi (I) selama periode waktu 100 hari dengan menggunakan metode numerik Runge-Kutta *forward-backward sweep*. Berdasarkan Gambar 1, pada skenario tanpa kontrol, populasi rentan menurun dari 990 menjadi hampir 0 dalam waktu kurang dari 20 hari karena tingginya tingkat infeksi. Sebaliknya, dengan kontrol optimal, populasi rentan menurun lebih lambat, tersisa sekitar 100 individu pada hari ke-100. Penurunan yang lebih lambat ini menunjukkan efektivitas kontrol dalam mengurangi laju penularan.

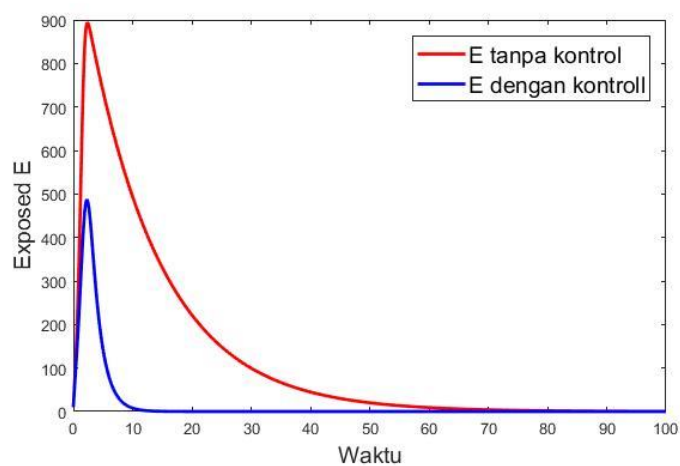
Pada Gambar 2, skenario tanpa kontrol, populasi terpapar mencapai puncak 875 pada hari ke-5 sebelum menurun, menunjukkan tingginya tingkat transmisi awal. Sementara itu, pada skenario dengan kontrol, populasi terpapar hanya mencapai puncak 490 pada hari ke-5 dan menurun dengan cepat hingga hampir nol pada hari ke-20. Penurunan ini menunjukkan bahwa kontrol optimal mampu secara signifikan menekan jumlah individu yang terpapar.

Pada Gambar 3, skenario tanpa kontrol, populasi terinfeksi mencapai puncak 500 pada hari ke-15 sebelum menurun. Sebaliknya, dengan kontrol optimal, populasi terinfeksi mencapai puncak yang jauh lebih rendah, yaitu sekitar 50, dan turun ke nol pada hari ke-20. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol optimal efektif dalam membatasi

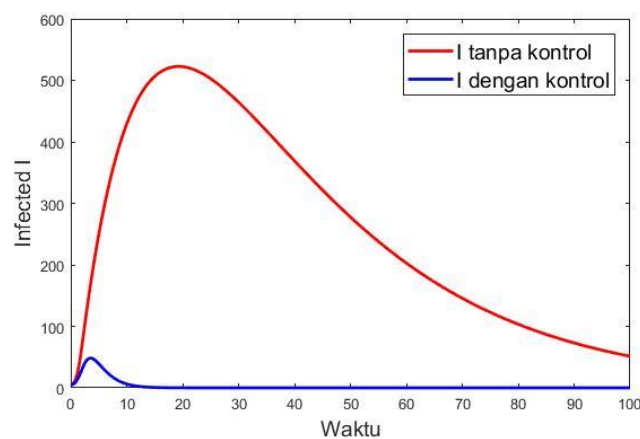
penyebaran infeksi. Populasi pulih atau sembuh pada skenario tanpa kontrol mencapai sekitar 990 pada akhir simulasi, karena hampir seluruh populasi telah terinfeksi dan sembuh. Dengan kontrol optimal, populasi pulih juga mencapai angka serupa tetapi tanpa menyebabkan lonjakan besar pada jumlah individu yang terinfeksi di tengah perjalanan.



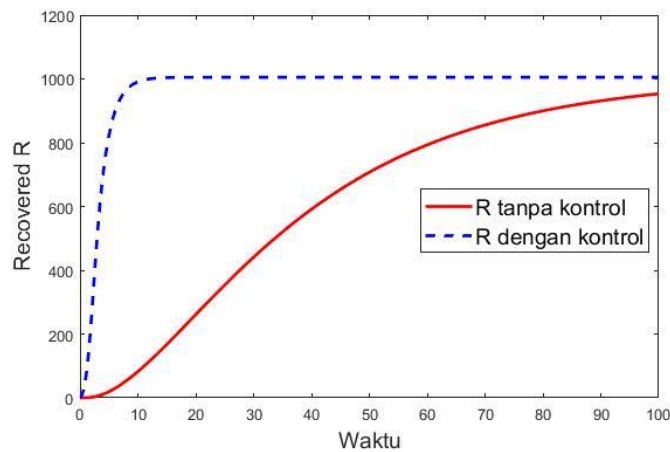
Gambar 1. Dinamika populasi dari individu susceptible (S)



Gambar 2. Dinamika populasi individu terpapar/*exposed* (E)



Gambar 3. Dinamika populasi individu terinfeksi (I)



Gambar 4. Dinamika populasi individu sembuh (R)

Simulasi menunjukkan bahwa strategi kontrol optimal, berupa karantina dan kampanye kesehatan, secara signifikan mengurangi jumlah individu yang terpapar dan terinfeksi. Berdasarkan Tabel 3, penurunan total infeksi dari 26.481 individu menjadi 267 individu menunjukkan efektivitas kontrol hingga 99,29%. Strategi ini juga memperpanjang waktu penyebaran penyakit, memberikan waktu yang lebih banyak untuk intervensi tambahan seperti vaksinasi atau pengobatan. Dengan demikian, kontrol optimal terbukti menjadi pendekatan yang sangat efektif dalam mengendalikan penyebaran penyakit *monkeypox*.

Tabel 3. Perbandingan sebelum dan setelah penerapan kontrol selama waktu 100 hari

Strategi	Total infeksi	Efektivitas kontrol	Biaya
Tanpa kontrol	26.481	-	26.481,94
Dengan kontrol	267	99,29%	2.934,47

Hasil simulasi membuktikan bahwa penerapan kontrol optimal, berupa karantina dan kampanye kesehatan, efektif dalam menekan laju penyebaran *monkeypox*. Strategi ini tidak hanya mengurangi jumlah infeksi tetapi juga membantu memperpanjang waktu yang tersedia untuk intervensi lebih lanjut, seperti pengadaan vaksinasi. Analisis ini memperkuat pentingnya pendekatan berbasis kontrol optimal dalam pengendalian penyakit menular.

Pada Tabel 3, biaya tanpa kontrol mencerminkan dampak langsung dari infeksi terhadap populasi, yang didominasi oleh jumlah individu yang terinfeksi selama simulasi. Angka yang tinggi menunjukkan bahwa tanpa intervensi, penyakit menyebar dengan cepat dan meluas, menyebabkan kerugian besar baik secara langsung (misalnya, biaya pengobatan dan perawatan) maupun secara tidak langsung (misalnya, kehilangan produktivitas). Tingginya nilai ini disebabkan oleh jumlah total infeksi yang jauh lebih besar dibandingkan dengan skenario dengan kontrol. Biaya dengan kontrol mencakup biaya infeksi yang lebih rendah karena jumlah individu yang terinfeksi berkurang secara signifikan, ditambah dengan biaya penerapan intervensi berupa karantina dan kampanye kesehatan. Biaya kontrol ini jauh lebih rendah dibandingkan dengan kerugian yang ditimbulkan oleh penyebaran penyakit tanpa kontrol. Penerapan strategi kontrol optimal berhasil menekan jumlah infeksi

hingga hampir 90%, meskipun memerlukan biaya tambahan untuk melaksanakan kontrol (u_1 dan u_2).

Dengan kontrol, total biaya dapat ditekan lebih dari 88% dibandingkan dengan skenario tanpa kontrol. Penurunan ini menunjukkan bahwa strategi kontrol optimal tidak hanya efektif dalam mengurangi jumlah individu yang terinfeksi, tetapi juga efisien secara ekonomi. Meskipun terdapat biaya tambahan untuk menjalankan kontrol (seperti karantina dan kampanye kesehatan), biaya ini jauh lebih kecil dibandingkan kerugian akibat tingginya tingkat infeksi pada skenario tanpa kontrol. Hasil ini menegaskan pentingnya penerapan strategi kontrol optimal dalam mitigasi wabah penyakit menular, seperti *monkeypox*, untuk mengurangi beban kesehatan dan ekonomi pada masyarakat.

SIMPULAN

Penelitian ini telah mengkaji penyebaran penyakit *monkeypox* menggunakan model SEIR yang dikontrol secara optimal dengan prinsip maksimum Pontryagin. Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang dilakukan, beberapa kesimpulan utama dapat diambil:

1. Pada skenario tanpa kontrol, penyakit menyebar dengan cepat, mencapai puncak jumlah terpapar sebanyak 875 individu dalam waktu 5 hari, dan puncak jumlah terinfeksi sebanyak 500 individu pada hari ke-15. Dengan kontrol optimal, lonjakan populasi terpapar dan terinfeksi dapat ditekan hingga puncak masing-masing 250 individu (terpapar) dan 50 individu (terinfeksi), dengan penyebaran berakhir lebih cepat.
2. Strategi kontrol optimal yang melibatkan karantina (u_1) dan kampanye kesehatan (u_2) mampu secara signifikan menekan jumlah individu yang terpapar dan terinfeksi. Simulasi menunjukkan bahwa total infeksi tanpa kontrol mencapai 26.481 individu, sedangkan dengan kontrol optimal turun drastis menjadi 267 individu, mengurangi infeksi hingga 99,29%.
3. Pada skenario tanpa kontrol, biaya tinggi sebesar 26.481,94 karena jumlah infeksi yang sangat besar menyebabkan kerugian langsung yang signifikan. Sedangkan dengan kontrol, meskipun ada biaya tambahan untuk melaksanakan intervensi, total biaya secara keseluruhan jauh lebih rendah sebesar 2.934,47, membuktikan bahwa kontrol optimal merupakan strategi yang tidak hanya efektif tetapi juga hemat biaya dalam pengendalian penyebaran penyakit *monkeypox*.
4. Kontrol optimal tidak hanya mengurangi jumlah infeksi, tetapi juga memperlambat penyebaran penyakit sehingga memberikan waktu lebih banyak untuk intervensi tambahan, seperti vaksinasi atau pengobatan. Hal ini memperlihatkan pentingnya pendekatan berbasis kontrol dalam upaya mitigasi wabah penyakit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Fakultas Sain, Institut Teknologi Sumatera.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sharma, H. Prasad, N. Kaeley, A. Bondalapati, L. Edara, and Y. A. Kumar, "Monkeypox epidemiology, clinical presentation, and transmission: a systematic review," Dec. 01, 2023, *BioMed Central Ltd.* doi: 10.1186/s12245-023-00491-3.
- [2] O. Mitjà *et al.*, "Monkeypox," Jan. 07, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/S0140-6736(22)02075-X.
- [3] D. E. Martínez-Fernández *et al.*, "Human Monkeypox: A Comprehensive Overview of Epidemiology, Pathogenesis, Diagnosis, Treatment, and Prevention Strategies," Jul. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/pathogens12070947.
- [4] Y. H. Luo, T. Zhang, J. L. Cao, W. S. Hou, A. Q. Wang, and C. H. Jin, "Monkeypox: An outbreak of a rare viral disease," Feb. 01, 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.jmii.2023.12.006.
- [5] J. Ferdous, M. A. Barek, M. S. Hossen, K. K. Bhowmik, and M. S. Islam, "A review on monkeypox virus outbreak: New challenge for world," *Health Sci Rep*, vol. 6, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.1002/hsr2.1007.
- [6] M. Sari and N. Hairunisa, "A review of the monkeypox outbreak in Indonesia in 2022," *Diponegoro Medical Journal (Jurnal Kedokteran Diponegoro)*, vol. 11, no. 5, pp. 268–274, Sep. 2022, doi: 10.14710/dmj.v11i5.35895.
- [7] E. Alakunle *et al.*, "A comprehensive review of monkeypox virus and mpox characteristics," 2024, *Frontiers Media SA*. doi: 10.3389/fcimb.2024.1360586.
- [8] M. Banuet-Martinez *et al.*, "Monkeypox: A review of epidemiological modelling studies and how modelling has led to mechanistic insight," May 23, 2023, *Cambridge University Press*. doi: 10.1017/S0950268823000791.
- [9] D. Suhika, "Efektivitas Skrining Genetik dalam Pengendalian Talasemia Beta Mayor di Indonesia Menggunakan Kontrol Backstepping," *Journal of Science and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 108–118, 2024.
- [10] D. Suhika, R. Saragih, and D. Handayani, "Application of optimal control on mathematical model for spreading of Covid-19," *AIP Publishing.*, vol. 3083, Jul. 2024, doi: 10.1063/5.0225256.
- [11] C. E. Madubueze, S. Dachollom, and I. O. Onwubuya, "Controlling the Spread of COVID-19: Optimal Control Analysis," *Comput Math Methods Med*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/6862516.
- [12] D. Bentaleb, Z. Khatar, and S. Amine, "Epidemiological modeling of monkeypox clades: a dual-strain SEIR approach with stability, bifurcation, and sensitivity analysis," *Model Earth Syst Environ*, 2024, doi: 10.1007/s40808-024-02162-5.
- [13] O. J. Peter, C. E. Madubueze, M. M. Ojo, F. A. Oguntolu, and T. A. Ayoola, "Modeling and optimal control of monkeypox with cost-effective strategies," *Model Earth Syst Environ*, vol. 9, no. 2, pp. 1989–2007, Jun. 2023, doi: 10.1007/s40808-022-01607-z.
- [14] O. J. Peter, F. A. Oguntolu, M. M. Ojo, A. Olayinka Oyeniyi, R. Jan, and I. Khan, "Fractional order mathematical model of monkeypox transmission dynamics," *Phys Scr*, vol. 97, no. 8, Aug. 2022, doi: 10.1088/1402-4896/ac7ebc.
- [15] T. Li and Y. Guo, "Modeling and optimal control of mutated COVID-19 (Delta strain) with imperfect vaccination," *Chaos Solitons Fractals*, vol. 156, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.chaos.2022.111825.
- [16] D. Suhika, R. Saragih, D. Handayani, and M. Apri, "Optimal control strategies based on extended Kalman filter in mathematical models of COVID-19," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 14, no. 6, pp. 6300–6312, Dec. 2024, doi: 10.11591/ijece.v14i6.pp6300-6312.
- [17] Suzanne Lenhart and John T. Workman, *Optimal Control Applied to Biological Models*. London: CRC Press, 2007.