

Analisis Kestabilan Model Penyebaran Penyakit Antraks pada Populasi Ternak dengan Transmisi Tak Langsung dan Penggunaan Disinfektan

Wahyudin Nur¹, Rini Renggawati², Dayasin³, Nurfasilah⁴, Syaherna Alam⁵, Rista Yanti⁶, Darmawati^{7*}

^{1,2,3,4,5,6,7}Department of Mathematics, Universitas Sulawesi Barat, Majene, Indonesia

Corresponding Email*: dharmawangsa.89@gmail.com

Abstrak

Antraks merupakan penyakit menular yang disebabkan oleh bakteri *Bacillus anthracis*. Penyakit ini mengakibatkan tingkat kematian yang cukup tinggi pada populasi ternak yang dapat mengancam ketahanan pangan suatu wilayah. Oleh karena itu, perlu dilakukan pencegahan dan penanggulangan penyebarannya. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji model penyebaran penyakit antraks dalam suatu populasi ternak dengan mempertimbangkan transmisi tak langsung dan penggunaan disinfektan. Model yang dikonstruksi dinyatakan sebagai sistem persamaan diferensial biasa. Analisis dinamik dilakukan untuk mengidentifikasi sifat kestabilan titik kesetimbangan bebas penyakit. Hasil analisis dinamik menunjukkan bahwa titik kesetimbangan bebas penyakit bersifat stabil bersyarat, yaitu ketika bilangan reproduksi dasar bernilai kurang dari satu. Selain itu, hasil eksperimen numerik menunjukkan bahwa penggunaan disinfektan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap dinamika penyebaran penyakit antraks, yaitu semakin tinggi laju kematian bakteri akibat disinfektan maka semakin sedikit kasus antraks. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan disinfektan dapat menjadi strategi yang efektif untuk mengendalikan penyebaran penyakit antraks pada populasi ternak.

Kata Kunci: analisis kestabilan, disinfektan, model antraks, transmisi tak langsung

Abstract

Anthrax is an infectious disease caused by the bacterium *Bacillus anthracis*. This disease causes a fairly high mortality rate in livestock populations that can threaten food security in a region. Therefore, it is necessary to prevent and control its spread. This study aims to examine the model of the spread of anthrax disease in a livestock population by considering indirect transmission and the use of disinfectants. The constructed model is expressed as a system of ordinary differential equations. Dynamical analysis is carried out to identify the stability properties of the disease-free equilibrium point. The results of the dynamical analysis show that the disease-free equilibrium point is conditionally stable, namely when the basic reproduction number is less than one. In addition, the results of numerical experiments show that the use of disinfectants has a significant effect on the dynamics of the spread of anthrax disease, namely the higher the rate of bacterial death due to disinfectants, the fewer cases of anthrax. This study shows that the use of disinfectants can be an effective strategy to control the spread of anthrax disease in livestock populations.

Keywords: stability analysis, disinfectant, anthrax model, indirect transmission

Received : 13-05-2024, Revised : 31-07-2024, Accepted : 01-09-2024

1. Pendahuluan

Peternakan adalah kegiatan memelihara hewan ternak dengan tujuan untuk dibudidayakan dan memperoleh keuntungan dari hasilnya. Sektor peternakan memegang peranan penting dalam pemenuhan kebutuhan pangan bagi Masyarakat. Usaha peternakan dapat meningkatkan pendapatan dan kesejahteraan Masyarakat, terutama kesejahteraan Masyarakat peternakan. Undang-Undang No.41 Tahun 2014 atas perubahan Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2009 Tentang Peternakan dan Kesehatan Hewan dijelaskan bahwa negara bertanggung jawab untuk melindungi segenap bangsa Indonesia melalui penyelenggaraan peternakan dan kesehatan hewan dengan mengamankan dan menjamin pemanfaatan dan pelestarian hewan untuk mewujudkan kedaulatan, kemandirian, serta ketahanan pangan dalam rangka menciptakan kesejahteraan dan kemakmuran seluruh rakyat Indonesia sesuai dengan amanat Undang-Undang Dasar Negara Republik Indonesia Tahun 1945. Selayaknya Indonesia mampu untuk memenuhi kebutuhan

pangan asal ternak sendiri dan malahan berpotensi menjadi negara pengekspor produk peternakan. Hal tersebut sangat mungkin diwujudkan karena ketersediaan sumber daya lahan dengan berbagai jenis tanaman pakan dan keberadaan SDM yang cukup mendukung. Namun demikian, kenyataan menunjukkan bahwa pembangunan peternakan di Indonesia masih belum berhasil dalam memenuhi kebutuhan dalam negeri, termasuk rentan terhadap serangan penyakit hewan berbahaya [1].

Salah satu jenis penyakit hewan menular strategis adalah antraks. Penyakit antraks merupakan penyakit zoonosis [2] karena dapat menginfeksi hewan dan manusia. Antraks adalah penyakit menular yang disebabkan oleh bakteri *Bacillus Anthracis* [3], yang bersifat fatal yang menyerang hewan ternak. Penyakit ini merupakan salah satu penyakit yang sudah dikenal selama berabad-abad. *Bacillus Anthracis* dapat membentuk spora yang tahan terhadap perubahan lingkungan dan dapat bertahan hidup selama 60 tahun di dalam tanah, sehingga sulit untuk dimusnahkan. Penyakit antraks dapat menyerang hewan herbivora seperti Sapi. Hewan dapat tertular melalui pakan (rumput) atau minuman yang terkontaminasi spora [4]. Adanya penyakit antraks di suatu tempat dapat menimbulkan kekhawatiran bagi masyarakat setempat, karena tidak hanya berdampak pada kesehatan masyarakat tetapi juga perekonomian masyarakat, terutama mereka yang menggantungkan hidup pada ternak [2]. Antraks merupakan penyakit menular yang dapat menyebabkan kematian dengan cepat dan menyerang hewan herbivora serta manusia. Pada hewan ternak, sapi dan domba merupakan kelompok yang paling rentan, diikuti oleh kambing dan kuda [5]. Dengan demikian, apabila tidak ditangani dengan baik, penyakit antraks dapat mengancam ketahanan pangan suatu wilayah.

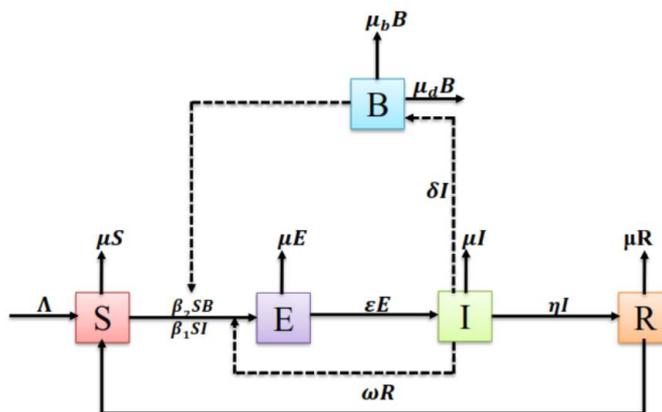
Beberapa peneliti telah mengembangkan model matematika untuk menyelidiki penyebaran penyakit menular [3], [6]–[10] dan penyebaran penyakit antraks [3], [6], [7]. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, pada penelitian ini dipertimbangan adanya transmisi tak langsung dan penggunaan disinfektan. Populasi ternak dibagi menjadi lima kompartemen.

2. Metode

Penelitian ini adalah penelitian studi literatur yang bertujuan untuk menganalisis model penyebaran penyakit antraks pada ternak. Tahapan pertama penelitian adalah mengonstruksi model matematika. Populasi ternak dalam penelitian ini terbagi dalam empat subpopulasi, yaitu subpopulasi rentan (S), subpopulasi terpapar (E), subpopulasi infeksius (I), dan subpopulasi kebal (R). Selain itu, terdapat populasi bakteri *Bacillus Anthracis* di permukaan benda (B). Selanjutnya diperoleh diagram alir penyebaran penyakit antraks yang terdiri atas lima kompartemen. Diagram alir pembagian kompartemen model dapat dilihat pada **Gambar 1**.

Perumusan model matematika penyebaran penyakit antraks dalam penelitian ini menggunakan asumsi berikut:

1. rekrutmen hanya terjadi pada individu kelas rentan;
2. pengobatan hanya diberikan pada individu infeksius;
3. individu yang kebal setelah sembuh dapat kembali pada individu kelas rentan;
4. transmisi penyakit dapat terjadi melalui benda yang tercemar bakteri;
5. disinfektan digunakan untuk memusnahkan bakteri *Bacillus Anthracis*.



Gambar 1. Diagram Alir Penyebaran Penyakit Antraks pada Ternak

Setelah mengonstruksi model matematika, dilakukan penentuan titik kesetimbangan bebas penyakit dan analisis syarat kestabilannya menggunakan metode pelinearan. Untuk mendukung hasil analisis dinamik dan menyelidiki dampak penggunaan disinfektan pada dinamika solusi model, penulis melakukan simulasi numerik.

3. Hasil dan Pembahasan

Model matematika yang bersesuaian dengan **Gambar 1** adalah

3.1 Model Matematika

$$\begin{aligned}
 \frac{dS(t)}{dt} &= \Lambda + \omega R - \beta_1 SI - \beta_2 SB - \mu S, \\
 \frac{dE(t)}{dt} &= \beta_1 SI + \beta_2 SB - (\varepsilon + \mu)E, \\
 \frac{dI(t)}{dt} &= \varepsilon E - (\eta + \mu)I, \\
 \frac{dR(t)}{dt} &= \eta I - (\omega + \mu)R, \\
 \frac{dB(t)}{dt} &= \delta I - \beta_2 SB - \mu_b B - \mu_d B.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Keterangan mengenai deskripsi dari semua variabel dan parameter model diberikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Deskripsi variabel dan parameter

Variabel/Parameter	Deskripsi
B	Ukuran populasi Bakteri <i>Bacillus Anthracis</i> di permukaan benda
S	Ukuran subpopulasi rentan
E	Ukuran subpopulasi terpapar
I	Ukuran subpopulasi infeksius
R	Ukuran subpopulasi kebal
Λ	Laju rekrutmen
μ	Laju kematian alami ternak
β	Laju transmisi bakteri <i>Bacillus Anthracis</i>
δ	Laju produksi bakteri oleh individu infeksius
ε	Laju perpindahan individu terpapar ke kelas infeksius
η	Laju kesembuhan
ω	Laju hilangnya kekebalan
μ _d	Laju kematian bakteri akibat penggunaan disinfektan

3.2 Titik Keseimbangan Bebas Penyakit

Titik keseimbangan dari sistem persamaan (1) diperoleh dengan cara menyelesaikan sistem berikut.

$$\begin{aligned}
 \Lambda + \omega R - \beta_1 SI - \beta_2 SB - \mu S &= 0, \\
 \beta_1 SI + \beta_2 SB - (\varepsilon + \mu)E &= 0, \\
 \varepsilon E - (\eta + \mu)I &= 0, \\
 \eta I - (\omega + \mu)R &= 0, \\
 \delta I - \beta_2 SB - \mu_b B - \mu_d B &= 0.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Titik keseimbangan bebas penyakit merupakan kondisi ketika semua individu menjadi sehat atau dapat dikatakan tidak terdapat penyakit pada populasi ($I = 0$). Setelah menyubstitusikan $I = 0$ ke persamaan (2) dan menyelesaikan sistem yang dihasilkan menggunakan metode substitusi secara simultan, diperoleh titik keseimbangan bebas penyakit, yaitu

$$E_0(S^*, E^*, I^*, R^*, B^*) = \left(\frac{\Lambda}{\mu}, 0, 0, 0, 0 \right).$$

3.3 Analisis Kestabilan

Bagian ini memaparkan sifat kestabilan titik keseimbangan bebas penyakit E_0 .

Teorema 1. Jika $\frac{\beta_1 S^* \varepsilon}{J_{22} J_{33}} + \frac{\delta \beta_2 S^* \varepsilon}{J_{22} J_{33} J_{55}} < 1$ maka titik keseimbangan bebas penyakit E_0 untuk sistem persamaan (1) bersifat stabil asimtotik lokal.

Bukti. Melalui pelinearan sistem (1) di sekitar E_0 , sifat kestabilan E_0 dapat diketahui [11], [12]. Matriks Jacobi sistem (1) di titik keseimbangan E_0 adalah

$$\begin{aligned}
 J_{E_0} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial S}(E_0) & \frac{\partial f_1}{\partial E}(E_0) & \frac{\partial f_1}{\partial I}(E_0) & \frac{\partial f_1}{\partial R} & \frac{\partial f_1}{\partial B}(E_0) \\ \frac{\partial f_2}{\partial S}(E_0) & \frac{\partial f_2}{\partial E}(E_0) & \frac{\partial f_2}{\partial I}(E_0) & \frac{\partial f_2}{\partial R} & \frac{\partial f_2}{\partial B}(E_0) \\ \frac{\partial f_3}{\partial S}(E_0) & \frac{\partial f_3}{\partial E}(E_0) & \frac{\partial f_3}{\partial I}(E_0) & \frac{\partial f_3}{\partial R} & \frac{\partial f_3}{\partial B}(E_0) \\ \frac{\partial f_4}{\partial S}(E_0) & \frac{\partial f_4}{\partial E}(E_0) & \frac{\partial f_4}{\partial I}(E_0) & \frac{\partial f_4}{\partial R} & \frac{\partial f_4}{\partial B}(E_0) \\ \frac{\partial f_5}{\partial S}(E_0) & \frac{\partial f_5}{\partial E}(E_0) & \frac{\partial f_5}{\partial I}(E_0) & \frac{\partial f_5}{\partial R} & \frac{\partial f_5}{\partial B}(E_0) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -(\beta_1(0) + \beta_2(0) + \mu) & 0 & -\beta_1 S^* & \omega & -\beta_2 S^* \\ \beta_1(0) + \beta_2(0) & -(\varepsilon + \mu) & \beta_1 S^* & 0 & \beta_2 S^* \\ 0 & \varepsilon & -(\eta + \mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta & -(\omega + \mu) & 0 \\ -\beta_2(0) & 0 & \delta & 0 & -(\beta_2 S^* + \mu_b + \mu_d) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -\mu & 0 & -\beta_1 S^* & \omega & -\beta_2 S^* \\ 0 & -(\varepsilon + \mu) & \beta_1 S^* & 0 & \beta_2 S^* \\ 0 & \varepsilon & -(\eta + \mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta & -(\omega + \mu) & 0 \\ 0 & 0 & \delta & 0 & -(\beta_2 S^* + \mu_b + \mu_d) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} -J_{11} & 0 & -\beta_1 S^* & \omega & -\beta_2 S^* \\ 0 & -J_{22} & \beta_1 S^* & 0 & \beta_2 S^* \\ 0 & \varepsilon & -J_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta & -J_{44} & 0 \\ 0 & 0 & \delta & 0 & -J_{55} \end{bmatrix},$$

dengan

$$J_{11} = (\mu),$$

$$J_{22} = (\varepsilon + \mu),$$

$$J_{33} = (\eta + \mu),$$

$$J_{44} = (\omega + \mu),$$

$$J_{55} = (\beta_2 S^* + \mu_b + \mu_d).$$

Persamaan karakteristik matriks J_{E_0} adalah

$$(\lambda + J_{11})(\lambda + J_{44})(\lambda^3 + P_1\lambda^2 + P_2\lambda + P_3) = 0, \quad (3)$$

dengan

$$P_1 = J_{22} + J_{33} + J_{55},$$

$$P_2 = J_{22}J_{33} + J_{22}J_{55} + J_{33}J_{55} - \beta_1 S^* \varepsilon,$$

$$P_3 = J_{22}J_{33}J_{55} - \beta_1 S^* \varepsilon J_{55} - \delta \beta_2 S^* \varepsilon.$$

Persamaan (3) mengindikasikan bahwa terdapat lima nilai eigen matriks J_{E_0} dengan dua nilai eigen bernilai negatif, yaitu:

$$\lambda_1 = -J_{11} = -\mu,$$

$$\lambda_2 = -J_{44} = -(\omega + \mu),$$

dan tiga nilai eigen lainnya, merupakan akar polinomial

$$(\lambda^3 + P_1\lambda^2 + P_2\lambda + P_3) = 0. \quad (4)$$

Berdasarkan kriteria Routh-Hurwitz [13], semua akar persamaan (4) memiliki bagian real negatif jika $P_1 > 0, P_1P_2 - P_3 > 0$, dan $P_3 > 0$.

Dapat ditunjukkan bahwa

$$P_1 = J_{22} + J_{33} + J_{55}$$

$$= (\varepsilon + \mu) + (\eta + \mu) + (\beta_2 S^* + \mu_b + \mu_d) > 0,$$

dan

$$P_1P_2 - P_3 = [(J_{22} + J_{33} + J_{55})(J_{22}J_{33} + J_{22}J_{55} + J_{33}J_{55} - \beta_1 S^* \varepsilon)] - (J_{22}J_{33}J_{55} - \beta_1 S^* \varepsilon J_{55} - \delta \beta_2 S^* \varepsilon)$$

$$= J_{22}J_{22}J_{55} + J_{33}J_{22}J_{55} + J_{33}J_{33}J_{55} + J_{55}J_{22}J_{33} + J_{55}J_{22}J_{55} + J_{55}J_{33}J_{55} \delta \beta_2 S^* \varepsilon + \left(1 - \frac{\beta_1 S^* \varepsilon}{J_{22}J_{33}}\right) J_{22}J_{22}J_{33} + \left(1 - \frac{\beta_1 S^* \varepsilon}{J_{22}J_{33}}\right) J_{33}J_{22}J_{33}.$$

Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa jika $1 > \frac{\beta_1 S^* \varepsilon}{J_{22}J_{33}}$ maka $P_1P_2 - P_3 > 0$. Sementara itu,

$$P_3 = J_{22}J_{33}J_{55} - \beta_1 S^* \varepsilon J_{55} - \delta \beta_2 S^* \varepsilon > 0$$

$$\text{Jika } J_{22}J_{33}J_{55} > \beta_1 S^* \varepsilon J_{55} + \delta \beta_2 S^* \varepsilon.$$

$$1 > \frac{\beta_1 S^* \varepsilon J_{55}}{J_{22}J_{33}J_{55}} + \frac{\delta \beta_2 S^* \varepsilon}{J_{22}J_{33}J_{55}}$$

$$1 > \frac{\beta_1 S^* \varepsilon}{J_{22}J_{33}} + \frac{\delta \beta_2 S^* \varepsilon}{J_{22}J_{33}J_{55}}.$$

Perhatikan bahwa semua parameter dan S^* bernilai positif. Oleh karena itu, $1 > \frac{\beta_1 S^* \varepsilon}{J_{22}J_{33}} + \frac{\delta \beta_2 S^* \varepsilon}{J_{22}J_{33}J_{55}}$ mengindikasikan bahwa $1 > \frac{\beta_1 S^* \varepsilon}{J_{22}J_{33}}$ dan $1 > \frac{\delta \beta_2 S^* \varepsilon}{J_{22}J_{33}J_{55}}$. Sehingga, terbukti bahwa jika $\frac{\beta_1 S^* \varepsilon}{J_{22}J_{33}} + \frac{\delta \beta_2 S^* \varepsilon}{J_{22}J_{33}J_{55}} < 1$, maka titik E_0 untuk sistem persamaan (1) stabil asimtotik lokal ■

Berdasarkan hasil analisis kestabilan, terlihat bahwa $\frac{\beta_1 S^* \varepsilon}{J_{22}J_{33}} + \frac{\delta \beta_2 S^* \varepsilon}{J_{22}J_{33}J_{55}} = 1$ menjadi ambang batas sifat

endemisitas penyakit antraks, yaitu saat $\frac{\beta_1 S^* \varepsilon}{J_{22} J_{33}} + \frac{\delta \beta_2 S^* \varepsilon}{J_{22} J_{33} J_{55}} < 1$, penyakit antraks berhasil dieradiksi . Oleh karena itu, kami mendefinisikan $\frac{\beta_1 S^* \varepsilon}{J_{22} J_{33}} + \frac{\delta \beta_2 S^* \varepsilon}{J_{22} J_{33} J_{55}}$ sebagai \mathcal{R}_0 .

3.4 Simulasi Numerik

Semua nilai parameter yang digunakan adalah asumsi karena simulasi numerik dilakukan hanya untuk keperluan ilustrasi yang mendukung hasil analisis dinamik. Selain itu, simulasi numerik juga dilakukan untuk menyelidiki dinamika Solusi model saat satu nilai parameter divariasikan, yaitu parameter laju kematian bakteri akibat penggunaan disinfektan (μ_d).

Tabel 2. Nilai parameter

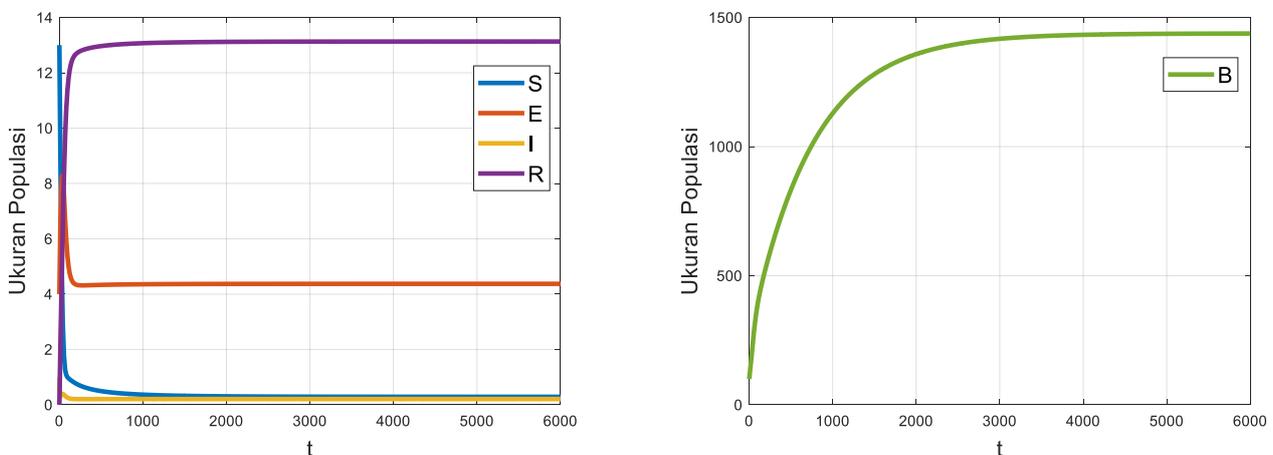
Parameter	Nilai Parameter
Λ	0.0164
μ	0.00091324
β_1	0.0002601047
β_2	0.0002602047
ε	0.0238
ω	0.007
η	0.5000025
μ_b	0.0014
δ	10

Nilai awal yang digunakan adalah $S(0) = 13, E(0) = 4, I(0) = 1, R(0) = 0$, dan $B(0) = 100$.

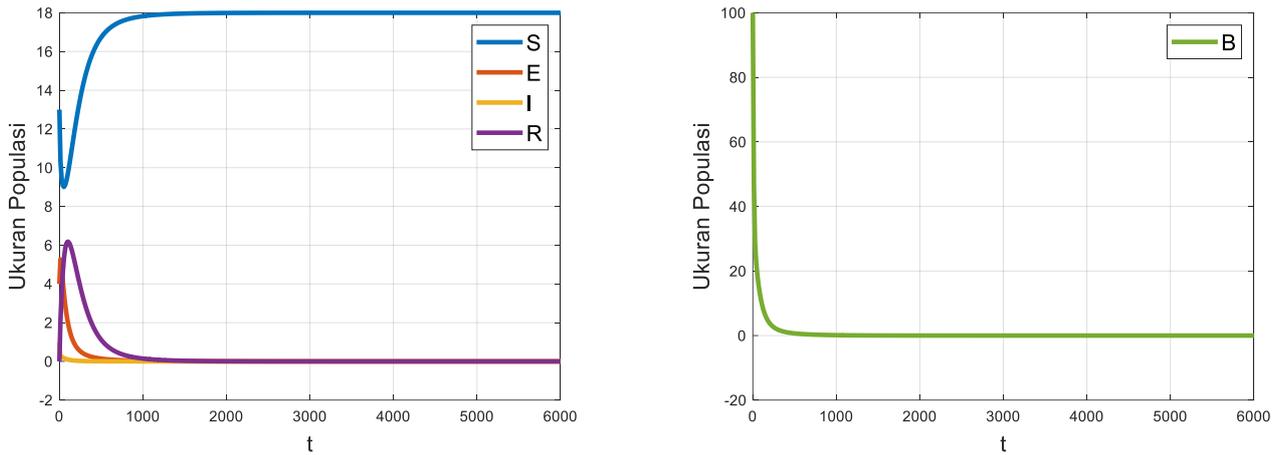
Tabel 3. hubungan μ_d dan \mathcal{R}_0

Nilai μ_d	\mathcal{R}_0
0	14.8843
0,1	0.8581
0,5	0.10.1869

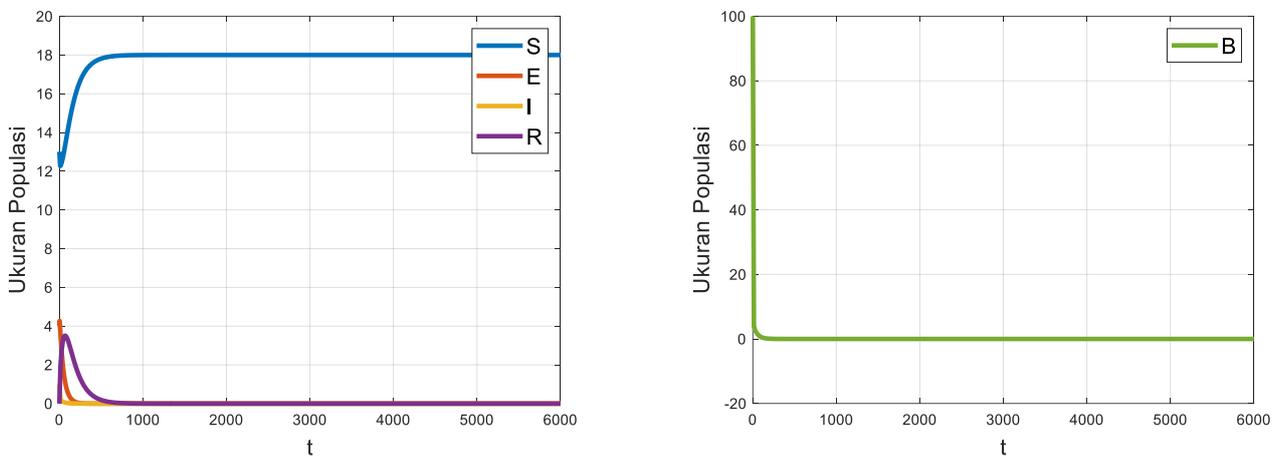
Penyelesaian secara numerik dilakukan dengan menggunakan nilai parameter pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**. Nilai μ_d divariasikan untuk menyelidiki dampak penggunaan disinfektan pada dinamika solusi model. **Tabel 3** memperlihatkan bahwa semakin tinggi laju kematian bakteri akibat penggunaan desifektan (μ_d), maka semakin kecil bilangan reproduksi dasar (\mathcal{R}_0).



Gambar 2. Dinamika solusi sistem (1) saat $\mathcal{R}_0 = 14.8843 > 1$ ($\mu_d = 0$)



Gambar 3. Dinamika solusi sistem (1) saat $\mathcal{R}_0 = 0.8581 < 1$ ($\mu_d = 0.1$)



Gambar 4. Dinamika solusi sistem (1) saat $\mathcal{R}_0 = 0.1869 < 1$ ($\mu_d = 0.5$)

Gambar 2-4 menunjukkan bahwa semakin tinggi laju kematian bakteri akibat disinfektan (μ_d) mengakibatkan jumlah subpopulasi terpapar dan infeksius menurun. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan disinfektan dapat menjadi strategi yang efektif untuk mengendalikan penyebaran penyakit antraks pada populasi ternak.

4. Kesimpulan

Model pada penelitian ini mempertimbangkan adanya penyemprotan cairan desinfektan dan transmisi tak langsung. Hasil analisis dinamik menunjukkan bahwa jika bilangan reproduksi dasar kurang dari satu maka titik kesetimbangan bebas penyakit bersifat stabil asimtotik lokal. Hasil simulasi numerik memperlihatkan semakin besar laju kematian bakteri akibat penggunaan disinfektan, maka semakin kecil bilangan reproduksi dasar dan kasus antraks.

Referensi

- [1] A. L. Dewi and L. P. Mpalasi, "Implementasi Kebijakan Undang-Undang No.41 Tahun 2014 atas perubahan Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2009 Tentang Peternakan dan Kesehatan Hewan terhadap Pelaku Usaha Agribisnis Peternakan di Kabupaten Konawe Selatan," *Arus J. Sos. dan Hum.*, vol. 3, no. 2, pp. 144–148, Aug. 2023, doi: 10.57250/ajsh.v3i2.241.

- [2] A. R. Khairullah *et al.*, “Anthrax disease burden: Impact on animal and human health,” *Int. J. One Heal.*, pp. 45–55, Feb. 2024, doi: 10.14202/IJOH.2024.45-55.
- [3] N. P. Asikin, S. Toaha, and Kasbawati, “VSEIR Mathematical Model on Anthrax Disease Dissemination in Animal Population with Vaccination and Treatment Effect,” *J. Mat. Stat. dan Komputasi*, vol. 17, no. 1, pp. 14–25, Aug. 2020, doi: 10.20956/jmsk.v17i1.10050.
- [4] Kementerian Kesehatan RI, “Petunjuk Teknis Pencegahan dan Pengendalian Antraks,” Jakarta, 2017.
- [5] M. Alam, M. Kamal, M. Rahman, A. Kabir, M. Islam, and J. Hassan, “Review of anthrax: A disease of farm animals,” *J. Adv. Vet. Anim. Res.*, vol. 9, no. 2, p. 323, 2022, doi: 10.5455/javar.2022.i599.
- [6] A. Alam and S. Sugiarto, “Analisis Sensitivitas Model Matematika Penyebaran Penyakit Antraks pada Ternak dengan Vaksinasi, Karantina dan Pengobatan,” *J. Ilm. Mat. DAN Terap.*, vol. 19, no. 2, pp. 180–191, Dec. 2022, doi: 10.22487/2540766X.2022.v19.i2.16017.
- [7] Megawati, R. Ratianingsih, and Hajar, “Analisis Kestabilan Penyebaran Penyakit Antraks Pada Populasi Hewan Dengan Pemberian Vaksinasi: Studi Kasus Untuk Infeksi Pada Populasi Manusia,” *J. Ilm. Mat. DAN Terap.*, vol. 16, no. 2, pp. 172–184, Jan. 2020, doi: 10.22487/2540766X.2019.v16.i2.14989.
- [8] A. Malik *et al.*, “Sensitivity analysis of COVID-19 with quarantine and vaccination: A fractal-fractional model,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 11, pp. 8859–8874, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.aej.2022.02.024.
- [9] W. Nur, Trisilowati, A. Suryanto, and W. M. Kusumawinahyu, “Mathematical model of schistosomiasis with health education and molluscicide intervention,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1821, no. 1, p. 012033, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1821/1/012033.
- [10] W. Nur *et al.*, “Mathematical Model of Foot and Mouth Disease Considering Vaccination Disinfection And Early Quarantine,” *Leibniz J. Mat.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–15, Jan. 2023, doi: 10.59632/leibniz.v3i1.199.
- [11] S. Wiggins, *Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos*, 2nd ed. New York: Springer, 2003.
- [12] L. Perko, *Differential Equations and Dynamical Systems*, 3rd ed. New York: Springer, 2001.
- [13] M. Y. Cook, *Flight Dynamics Principles*, Second. UK: Elsevier, 2007.



© The Author(s) 2024. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License. Editorial of Journal of Mathematics: Theory and Applications, Department of Mathematics, Universitas Sulawesi Barat, Jalan Prof. Dr. Baharuddin Lopa, S.H., Talumung, Majene 91412, Sulawesi Barat.