Case Study at Institut Teknologi Kalimantan Analisis Model Matematika Penyebaran Penyakit Tuberkulosis di Kota Balikpapan dengan Pengaruh Migrasi

Afif Ma'ruf[1], Abrari Noor Hasmi[2*], Indira Anggriani[3]
Jurusan Matematika dan Teknologi Informasi, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan.[123]
afifmaruf830@gmail.com[1], abrari@lecturer.itk.ac.id[2], indira@lecturer.itk.ac.id[3]

Article Info

Article history:

Submitted April 2022
Revised April 2022
Accepted April 2022
Published August 2022

Keyword:

Stability Analysis
Disease Free
Disease Endemic
Tuberculosis
Migration

ABSTRACT

Tuberculosis (TB) is a global health problem caused by a bacterium called Mycobacterium Tuberculosis. Tuberculosis is a disease that infects the lungs, although this disease can infect other organs, such as the kidneys, spine, and brain. In 2019 Indonesia was in the third position with the highest number of tuberculosis cases after India and China. Meanwhile, in Balikpapan City in 2019 as many as 33 residents died, 356 residents recovered, and 50 residents were in the process of being treated for tuberculosis. Therefore, there is a need for research on the spread of tuberculosis in the city of Balikpapan. This study aims to determine the mathematical model and stability analysis of the spread of tuberculosis with the influence of migration. In this study, several stages were carried out, namely the stage of forming a SITR-based model for the spread of tuberculosis, the stage of determining the equilibrium point, the stage of stability analysis using Routh Hurwitz criteria, and the stage of numerical simulation. After performing algebraic manipulation by adding the assumption of migration, where the migration of people from outside to the city and migration out of the city of Balikpapan, then two equilibrium points are obtained, namely the disease-free equilibrium point and the disease endemic equilibrium point. Parameter sensitivity analysis shows that at certain parameter values, there is a qualitative change in system behavior, namely population extinction. In the simulation of the disease-free equilibrium point, it was found that the value of the S variable always increases and continues to a point, while the I, T, and R variables go to zero, meaning that the disease-prone subpopulation will continue to increase, while in the infected subpopulation, treatment and recovery are not there are individuals infected with tuberculosis.

Kata Kunci:

Analisis Kestabilan
Bebas Penyakit
Endemik Penyakit
Tuberkulois
Migrasi

ABSTRAK

Tuberkulosis (TB) menjadi salah satu masalah kesehatan global disebabkan oleh bakteri yang bernama *Mycobacterium Tuberculosis*. Penyakit tuberkulosis merupakan penyakit yang menginfeksi paru-paru, meskipun demikian penyakit ini dapat menjangkiti organ lainnya, seperti ginjal, tulang belakang hingga otak. Pada tahun 2019 Indonesia menempati posisi ketiga dengan jumlah kasus tuberkulosis terbanyak setelah India dan Tiongkok. Sementara itu, di Kota Balikpapan pada tahun 2019 sebanyak 33 warga meninggal, 356 warga sembuh, dan 50 warga yang dalam proses pengobatan penyakit tuberkulosis. Oleh karena itu, perlu adanya penelitian mengenai penyebaran penyakit tuberkulosis di Kota Balikpapan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui model matematika dan analisis kestabilan dari penyebaran penyakit tuberkulosis dengan pengaruh migrasi. Dalam penelitian ini dilakukan beberapa tahapan yaitu tahap pembentukan model penyebaran penyakit tuberkulosis berbasis $SITR$, tahap penentuan titik kesetimbangan, tahap analisis kestabilan dengan menggunakan kriteria Routh Hurwitz, dan tahap simulasi numerik. Setelah dilakukan manipulasi aljabar dengan menambahkan asumsi migrasi, dimana migrasi penduduk dari luar ke dalam kota dan migrasi keluar kota Balikpapan, kemudian diperoleh dua titik kesetimbangan yaitu titik kesetimbangan bebas penyakit dan titik kesetimbangan endemik penyakit. Analisis sensitivitas parameter menunjukan pada nilai parameter tertentu, terjadi perubahan perilaku sistem secara kualitatif yaitu terjadi kepunahan populasi. Pada simulasi titik kesetimbangan bebas penyakit didapatkan bahwa nilai dari variabel S selalu naik dan kontinu ke suatu titik, sedangkan variabel $I, T,$ dan R menuju angka nol, artinya pada sub populasi rentan penyakit akan terus bertambah, sedangkan pada sub populasi terinfeksi, berobat dan sembuh tidak ada individu yang terinfeksi dari penyakit tuberkulosis.

1. PENDAHULUAN

Tuberkulosis (TB) menjadi masalah kesehatan global disebabkan oleh bakteri yang bernama *Mycobacterium tuberculosis*. Tuberkulosis merupakan penyakit yang umumnya menular melalui udara. Ketika penderita tuberkulosis aktif memercikkan lendir atau dahak saat batuk atau bersin, bakteri tuberkulosis akan ikut keluar melalui lendir tersebut dan terbawa ke udara. Selanjutnya, bakteri tuberkulosis akan masuk ke tubuh orang lain melalui udara yang dihirup nya. Tuberkulosis tidak menular melalui kontak fisik seperti jabat tangan atau menyentuh peralatan yang telah terkontaminasi bakteri tuberkulosis, salah satu tindakan yang dapat dicegah untuk meminimalisir penyebaran penyakit tuberkulosis antara lain menggunakan masker ketika berpergian keluar rumah(Kartasasmita, 2016).Kebersihan lingkungan dapat mempengaruhi penyebaran bakteri, misalkan rumah yang kurang baik dalam pengaturan ventilasi. Kondisi lembab akibat kurang baik dalam pergantian udara dan sinar matahari dapat membantu berkembangbiaknya bakteri, oleh karena itu seorang yang sehat jika serumah dengan penderita tuberkulosis merupakan kelompok yang rentan terhadap penularan penyakit tuberkulosis. Pada tahun 2019 sekitar 10 juta orang jatuh sakit diakibatkan tuberkulosis di seluruh dunia, sebanyak 5,6 juta pria, 3,2 juta wanita, dan 1,2 juta anak-anak. Pada tahun 2019, WHO (*World Health Organization)* melaporkan bahwa Indonesia menduduki posisi ketiga dengan kasus tuberkulosis (TB) tertinggi di dunia setelah India dan Tiongkok (WHO, 2020). Sementara itu, di kota Balikpapan pada tahun 2019 sebanyak 33 warga meninggal, 356 warga sembuh, dan 50 warga yang dalam proses pengobatan penyakit tuberkulosis.

Berdasarkan latar belakang tersebut, diperoleh ide penelitian tentang penyebaran penyakit tuberkulosis. Penerapan dari model penyebaran dapat membantu untuk mengetahui penyebaran penyakit tuberkulosis. Referensi model matematis diperoleh dari penelitian (Side et al., 2016) yang bertemakan model matematis penyebaran penyakit tuberkulosis. Pengembangan pada model dilakukan dengan menambahkan pengaruh migrasi kedalam maupun keluar kota Balikpapan. Hal ini dirasa perlu karena Balikpapan merupakan kota dengan mobilitas penduduk yang cukup tinggi baik kedalam maupun keluar kota. Kemudian model yang telah dimodifikasi dianalisis kesetimbangan untuk didapatkan titik endemik penyakit dan titik bebas penyakit tuberkulosis, kemudian dianalisis kestabilan sistem pada titik kesetimbangan, setelah diketahui kesetimbangan sistem dilakukan simulasi secara numerik. Hasil dari penelitian ini yaitu faktor-faktor yang mempengaruhi tingkat penyebaran penyakit tuberkulosis di Kota Balikpapan.

2. METODE

Pada penelitian ini akan dikonstruksi model penyebaran penyakit TBC dengan melibatkan migrasi penduduk. Untuk itu diperlukan adanya studi pustaka khususnya mengenai penyebaran

Submitted April 2022, Revised April 2022, Accepted August 2022, Published August 2022

penyakit. Pada penelitian ini model yang digunakan merupakan modifikasi dari model yang diajukan pada (Side et al., 2016) sebagai berikut:

$$\frac{dS}{dt} = bN - \left(\beta\frac{I}{N} + \mu\right)S,$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta\frac{I}{N}S - (a + \mu)I,$$

$$\frac{dT}{dt} = aI - (\gamma + \mu)T,$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma T - \mu R,$$

Modifikasi dilakukan dengan tambahan asumsi perpindahan penduduk dari luar kota ke dalam kota Balikpapan dan perpindahan penduduk dari dalam keluar Kota Balikpapan. (Suryani et al., 2019).

Setelah dilakukan konstruksi model, maka dilanjutkan dengan tahap selanjutnya yaitu penentuan titik kesetimbangan serta kestabilannya dengan kriteria Routh Hurwitz. Titik kesetimbangan yang stabil secara intuitif bermakna bahwa solusi model yang berada pada dekat dengan titik stabil akan tetap berada dekat dengan kestabilan tersebut. Sedangkan titik kesetimbangan tak stabil akan mengakibatkan solusi semakin menjauh dari titik kesetimbangan. Simulasi numerik dengan bantuan software dari penyelesaian model tuberkulosis menggunakan metode Runge-Kutta orde 4 karena orde yang lebih tinggi melibatkan perhitungan yang makin rumit dan tidak efisien

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada hasil dan pembahasan dijelaskan mengenai konstruksi model, penentuan titik kesetimbangan, dan kestabilan sistem dari penyebaran penyakit TBC dengan melibatkan migrasi penduduk. Selanjutnya, hasil kestabilan sistem yang diperoleh dilakukan simulasi numerik dengan metode Runge-Kutta dan disimulasikan menggunakan software.

3.1. Konstruksi Model

Model dibangun berdasarkan model yang disusun oleh Side et al.(2016) yang membagi populasi menjadi 4 sub populasi yaitu 6 menggunakan variabel $SITR$, dimana $S(t)$ adalah sub populasi yang rentan terhadap penyakit tuberkulosis pada saat t. Sedangkan variabel I, T, R masing-masing menyatakan, I subpopulasi yang terinfeksi penyakit tuberkulosis, T dalam masa pengobatan penyakit tuberkulosis dan, R adalah subpopulasi yang sembuh dari penyakit tuberkulosis. Notasi $N = S + I + T + R$ menyatakan jumlah dari keseluruhan subpopulasi. Pada model matematika yang dibentuk mempertimbangkan aspek migrasi, di mana diasumsikan bahwa perpindahan penduduk dari luar ke dalam daerah dan perpindahan penduduk dari dalam keluar daerah.

Pada model ini, jumlah populasi dapat bertambah melalui dua mekanisme, yaitu (1) melalui kelahiran secara alami yang diasumsikan proporsional dengan jumlah populasi N dan laju kelahiran b dan (2) melalui perpindahan penduduk dari luar dan kedalam kota Balikpapan. Penduduk yang pindah ke dalam kota diasumsikan tidak sedang dalam perawatan penyakit tuberkulosis, sehingga dengan laju perpindahan ke dalam kota adalah θ_1 .

Sedangkan untuk pengurangan jumlah populasi, ada tiga mekanisme yang mungkin: (1) Adanya kematian alami dengan laju μ berlaku pada semua subpopulasi (2) Adanya kematian karena penyakit, kematian ini hanya terjadi pada sub populasi terinfeksi dan dalam perawatan. Laju kematian karena penyakit memiliki laju δ . (3) Adanya perpindahan penduduk dari dalam keluar kota dengan laju perpindahan θ_2. Sama seperti pada perpindahan ke dalam kota, subpopulasi yang sedang melakukan perawatan, dianggap tidak pindah ke luar kota Balikpapan.

Submitted April 2022, Revised April 2022, Accepted August 2022, Published August 2022

Perpindahan antar sub populasi terjadi karena beberapa faktor: (1) Adanya infeksi penyakit dengan laju penyebaran β. Hal ini tentunya akan mengakibatkan penduduk dalam sub populasi rentan (S) menjadi sub populasi terinfeksi (I). (2) Proses pengobatan penyakit TBC yang merubah penduduk di subpopulasi (I) menjadi anggota subpopulasi (T). Notasi laju pengobatan adalah α. (3) Kesembuhan penduduk yang terinfeksi dengan laju γ.

Berdasarkan penjelasan di atas didapatkan model matematis sebagai berikut:

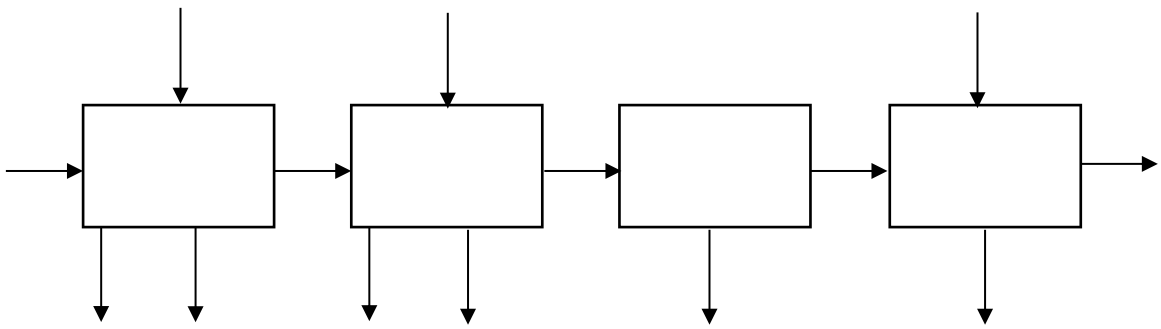
$$\frac{dS}{dt} = bN - \left(\beta \frac{I}{N} + \mu + \theta_2 - \theta_1\right) S, \tag{1}$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta \frac{I}{N} S - (a + \mu + \delta + \theta_2 - \theta_1) I, \tag{2}$$

$$\frac{dT}{dt} = aI - (\gamma + \mu + \delta) T, \tag{3}$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma T - (\mu + \theta_2 - \theta_1) R, \tag{4}$$

Model diatas dapat dinyatakan dalam diagram kompartemen sebagai berikut:



Gambar 1. Diagram Kompartemen

3.2. Penentuan Titik Kesetimbangan

Titik kesetimbangan bebas penyakit merupakan titik tetap yang tidak berubah terhadap waktu, oleh karena itu pada kasus model penyebaran penyakit didapatkan bahwa titik tetap bebas penyakit E_0 dan titik tetap endemic penyakit, dengan membuat $\frac{dS}{dt} = 0, \frac{dI}{dt} = 0, \frac{dT}{dt} = 0, \frac{dR}{dt} = 0$. Perhitungan titik kesetimbangan dilakukan terhadap persamaan diferensial (1) – (4). Titik kesetimbangan bebas penyakit merupakan titik tetap dimana tidak terdapat lagi individu yang terinfeksi, secara matematis berarti $I = T = R = 0$. Dengan menggunakan kondisi ini pada persamaan (1) diperoleh bahwa syarat titik tetap adalah

$$-(\mu + \theta_2 - \theta_1 - b) S = 0 \tag{5}$$

Persamaan diatas berarti bahwa titik tetap bebas penyakit hanya ada ketika $S = 0$ atau $\mu + \theta_2 = \theta_1 + b$. Kondisi $S = 0$ berarti bahwa tidak ada populasi di dalam sistem, tentu hal ini merupakan kondisi yang tidak realistis sehingga kita dapat mengabaikannya. Akibatnya kondisi atau $\mu + \theta_2 = \theta_1 + b$ harus dipenuhi agar diperoleh titik tetap bebas penyakit. Syarat ini dapat diinterpretasikan bahwa agar tercipta titik tetap bebas penyakit, jumlah populasi yang meninggalkan sistem (e.g. karena kematian dan emigrasi) harus seimbang dengan populasi yang memasuki sistem (e.g. kelahiran dan imigrasi).

Submitted April 2022, Revised April 2022, Accepted August 2022, Published August 2022

Perhitungan titik kesetimbangan endemik penyakit dilakukan dengan kondisi bahwa $\left(\frac{dS}{dt}=0, \frac{dI}{dt}=0, \frac{dT}{dt}=0, \frac{dR}{dt}=0\right)$, dengan menggunakan persamaan diferensial pada persamaan (1)-(4) setelah dilakukan memanipulasi aljabar didapatkan titik kesetimbangan endemik penyakit sebagai berikut,

$$E_1 = \left(\frac{x}{\beta}, \frac{b\beta-(yx)}{x\beta}, \frac{a(b\beta-yx)}{zx\beta}, \frac{\gamma a(b\beta-yx)}{yzx\beta}\right)N \tag{6}$$

dimana,

$$x = a+\mu+\delta+\theta_2-\theta_1,$$
$$y = \mu+\theta_2-\theta_1,$$
$$z = \gamma+\mu+\delta,$$

3.3. Kestabilan Sistem

Tahap selanjutnya yaitu mencari titik kesetimbangan yang ditetapkan pada persamaan bebas penyakit E_0 selanjutnya dianalisis kestabilannya. Titik kesetimbangan yang didapat yaitu sebagai berikut,

$$E_o = \{S, 0, \ 0, 0\}, \text{ dan } \ \mu+\theta_2 = \theta_1 + b.$$

Matriks Jacobi ditentukan dengan menurunkan persamaan (1)-(4) terhadap masing-masing peubah(Walz et al., 1995):

$$J = \Big[b-(\mu+\theta_2-\theta_1) - \frac{\beta I(I+T+R)}{(I+T+R+S)^2} \ b - \left(\frac{\beta S(T+R+S)}{(I+T+R+S)^2}\right) \ b \ b \ \frac{\beta I(I+T+R)}{(I+T+R+S)^2} \ \frac{\beta S(T+R+S)}{(I+T+R+S)^2} - (a+\mu+\delta+\theta_2-\theta_1) \ 0 \ 0 \ 0 \ a \ -(\gamma+\mu+\delta) \ 0 \ 0 \ 0 \ \gamma \ -(\mu+\theta_2-\theta_1)\Big]$$

Matriks Jacobi diatas selanjutnya dievaluasi pada titik tetap bebas penyakit yaitu dengan memperhatikan kondisi $b+\ \theta_1 = (\mu+\theta_2)$ dan $I = T = R = 0$, didapatkan matriks Jacobi untuk titik kesetimbangan E_0 sebagai berikut,

$$JE_0 = [b-(\mu+\theta_2-\theta_1) \ b \ b \ b \ 0 \ -(a+\mu+\delta+\theta_2-\theta_1) \ 0 \ 0 \ 0 \ a \ -(\gamma+\mu+\delta) \ 0 \ 0 \ 0 \ \gamma \ -(\mu+\theta_2-\theta_1)\ ]$$

Karena $b \ = \mu+\theta_2-\theta_1$

$$JE_0 = [0 \ b \ b \ b \ 0 \ -(a+\delta+b) \ 0 \ 0 \ 0 \ a \ -(\gamma+\mu+\delta) \ 0 \ 0 \ 0 \ \gamma \ -b\ ]$$

Setelah didapatkan matriks Jacobi untuk titik kesetimbangan bebas penyakit langkah selanjutnya yaitu mencari persamaan karakteristik dengan menggunakan aturan kofaktor, dalam hal ini kita bisa memilih ekspansi kolom pertama, sehingga diperoleh persamaan karakteristik

$$|\lambda I - JE_0| = \lambda(\lambda+a+\delta+b)(\lambda+\gamma+\mu+\delta)(\lambda+b) \tag{7}$$

Dari persamaan 7 didapatkan nilai eigen sebagai berikut,

$$\lambda_1 = 0$$
$$\lambda_2 = -(a+\delta+b)$$
$$\lambda_3 = -(\gamma+\mu+\delta)$$
$$\lambda_4 = -b$$

Dengan memperhatikan bahwa berdasarkan aspek fisis dan interpretasi dari masing-masing parameter, kita dapat memastikan bahwa semua parameter pada persamaan (1)-(4) bernilai positif, akibatnya dapat dipastikan bahwa $\lambda_{2,3,4} < 0$. Secara umum, pada sistem linear, jika ada nilai eigen

Submitted April 2022, Revised April 2022, Accepted August 2022, Published August 2022

bernilai 0 dan multiplisitas geometri dan aljabar pada nilai eigen 0 sama, maka sistem dapat dikatakan stabil (Olsder and Van der Woude, 1997). Namun untuk sistem tak linear, nilai eigen bernilai 0 tidak memberikan kepastian apapun dalam kestabilan sistem. Hal ini dikarenakan adanya sedikit perturbasi pada sistem dapat merubah perilaku sistem secara drastis. Sehingga pelinearan sistem sebagaimana yang dilakukan pada analisis ini tidak menghasilkan kesimpulan yang pasti tentang kestabilan sistem. Diperlukan analisis yang lebih dalam dengan metode yang lain untuk dapat memastikan kestabilan dari sistem ini. Namun demikian, kita dapat menduga bahwa pada nilai parameter tertentu sistem ini stabil dikuatkan dengan simulasi numerik dari model persamaan diferensial ini. Riset dapat dilanjutkan dengan mencoba menganalisis kestabilan dengan metode lain misalnya metode Lyapunov (Olsder and Van der Woude, 1997).

3.4. Simulasi Numerik

Simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan metode Runge-Kutta orde empat dengan bantuan software python (Burden and Faires, 2016). Parameter yang digunakan dalam simulasi numerik merupakan asumsi yang bergantung dan memenuhi syarat kestabilan dengan syarat titik kesetimbangan yang diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Syarat Titik Kesetimbangan

Titik Kesetimbangan	Syarat Eksis	Syarat KEstabilan	Keterangan
Bebas Penyakit $\boldsymbol{E_o = \{S, 0,\ 0, 0\}}$	Jika dan hanya jika $\mu + \theta_2 = \theta_1 + b$	$0 > 0$	Stabil
		$(\alpha + \delta + b) > 0$	Stabil
		$(\gamma + \mu + b) > 0$	Stabil
		$b > 0$	Stabil

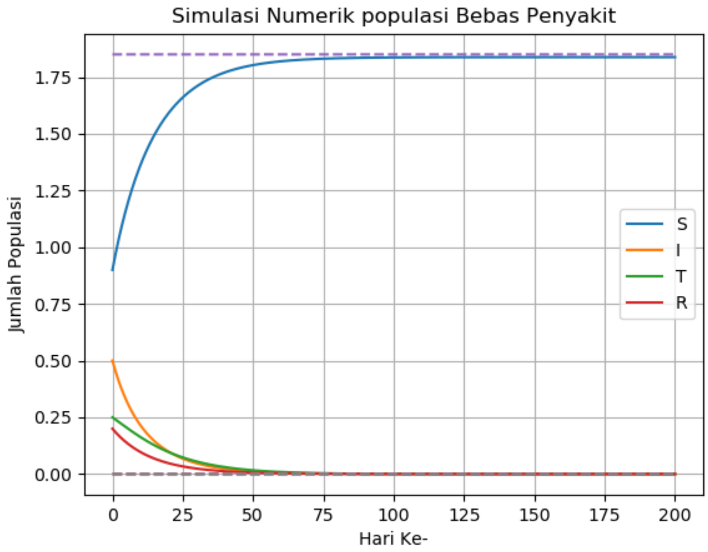
Titik kesetimbangan $E_o = \{S, 0,\ 0, 0\}$ stabil jika nilai parameter memenuhi syarat kestabilan yang ditunjukkan pada Tabel 1 sehingga didapatkan nilai-nilai parameter sebagai berikut,

Tabel 2 Nilai Parameter Model Matematis Penyebaran Tuberkulosis

Variabel & Parameter	Nilai Parameter
b	0.08
μ	0.06
β	0.04
a	0.02
γ	0.0005
N	0.7
θ_1	0.05
θ_2	0.07
δ	0.01

Simulasi numerik dilakukan dengan nilai awal $E(0) = (S(0), I(0), T(0), R(0)) = (0.9, 0.5, 0.25, 0.2)$. Berdasarkan nilai parameter yang ditunjukkan pada tabel diatas, hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 2.

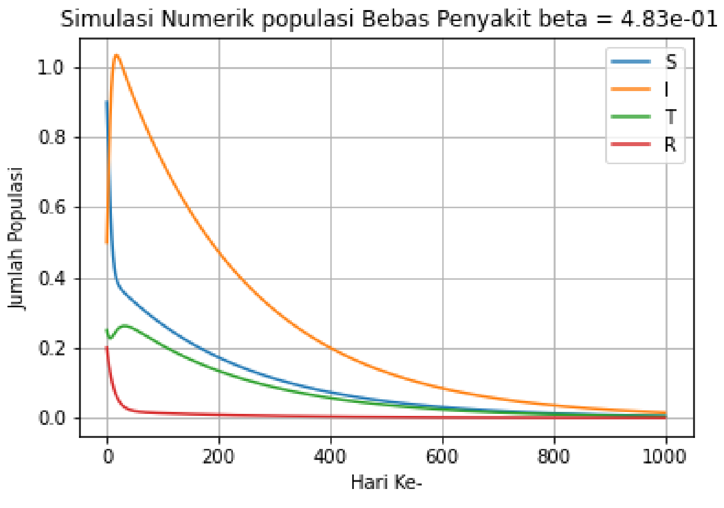
Submitted April 2022, Revised April 2022, Accepted August 2022, Published August 2022



Gambar 2. Grafik Populasi Bebas Penyakit

Berdasarkan gambar diatas terlihat bahwa semakin lama jumlah populasi yang terinfeksi, dirawat serta sembuh akan menuju 0, sedangkan jumlah populasi rentan akan bertambah dan stagnan di nilai tertentu. Perilaku ini mengindikasikan bahwa pada parameter diatas mengakibatkan sistem stabil pada titik tetap bebas penyakit.

Untuk melihat sensitivitas hasil simulasi terhadap parameter, kita akan memvariasikan nilai parameter laju penyebaran penyakit β. Kita akan memilih ruang parameter β dengan mengambil 20 nilai berurutan secara logaritmik pada interval $[10^{-3}, 1]$. Berdasarkan pengamatan pada hasil simulasi, terdapat perubahan perilaku solusi secara kuantitatif pada nilai parameter $\beta = 0.113$. Perubahan yang terjadi adalah bukan hanya jumlah sub populasi terinfeksi, dalam perawatan serta sembuh yang menuju 0, namun juga jumlah sub populasi rentan menuju 0. Kami menunjukan hasil simulasi pada nilai $\beta = 0.483$ pada Gambar 3. Hal ini terjadi ketika laju penyebaran sangat sehingga mengakibatkan kepunahan pada populasi. Meskipun demikian, hasil simulasi ini belum membuktikan bahwa adanya perubahan kestabilan pada titik tetap bebas penyakit, mengingat nilai S pada titik tetap bebas penyakit bisa saja bernilai 0.



Gambar 3. Hasil simulasi dengan menunjukan jumlah populasi menuju 0

Submitted April 2022, Revised April 2022, Accepted August 2022, Published August 2022

4. KESIMPULAN

Diberikan kesimpulan yang dapat memenuhi tujuan dari penelitian ini antara lain sebagai berikut,

1. Model matematis penyebaran penyakit tuberkulosis di Balikpapan dituliskan pada persamaan (1)–(4).

2. Berdasarkan hasil perhitungan dan substitusi parameter, didapatkan 2 titik kesetimbangan yaitu titik kesetimbangan bebas penyakit $E_o = \{S, 0,\ 0, 0\}$, jika dan hanya jika $\mu + \theta_2 = \theta_1 + b$ dan titik kesetimbangan endemik penyakit $E_1 = \left(\frac{x}{\beta}, \frac{b\beta-(yx)}{x\beta}, \frac{a(b\beta-yx)}{zx\beta}, \frac{\gamma a(b\beta-yx)}{yzx\beta}\right)N$.

3. Analisis kestabilan pada titik tetap bebas penyakit menunjukan tiga nilai eigen negatif dan satu nilai eigen bernilai 0. Tidak diperoleh kesimpulan definitif tentang kestabilan pada titik tetap bebas penyakit. Diperlukan analisis yang lebih dalam menggunakan metode Lyapunov.

4. Faktor berkurangnya masyarakat Susceptible yaitu ketika terjadinya proses penyebaran penyakit dari sub populasi Infective ke sub populasi Susceptible, kematian alami, dan perpindahan penduduk dari dalam keluar Kota Balikpapan, berkurangnya faktor subpopulasi Infective yaitu antara lain pemberian Treatment dari penyakit tuberkulosis, kematian alami yang disebabkan selain penyakit tuberkulosis, kematian alami, dan perpindahan penduduk dari dalam keluar Kota Balikpapan, berkurangnya faktor subpopulasi Treatment yaitu angka kesembuhan pasien yang mengidap penyakit tuberkulosis, kematian alami dan kematian yang disebabkan oleh penyakit tuberkulosis, berkurangnya faktor subpopulasi Recovered antara lain kematian alami, dan perpindahan penduduk dari dalam ke luar Kota Balikpapan.

REFERENSI

[1] Burden, R., Faires, J., 2016. Numerical Analysis, 10th ed. Brooks/Cole, Cangage Learning, Boston, MA. https://doi.org/10.13140/2.1.4830.2406.

[2] Kartasasmita, C.B., 2016. Epidemiologi Tuberkulosis. Sari Pediatr. 11, 124. https://doi.org/10.14238/sp11.2.2009.124-9.

[3] Side, S., Sanusi, W., Setiawan, N.F., 2016. Analisis dan Simulasi Model SITR pada Penyebaran Penyakit Tuberkulosis di Kota Makassar. Sainsmat J. Ilm. Ilmu Pengetah. Alam 5.

[4] Suryani, I., Wartono, Aprijon, Prasetyo, R., 2019. Kestabilan Model SIRD Penyebaran Penyakit Ebola Dengan Pengaruh Adanya Migrasi, in: Seminar Nasional Teknologi Informasi, Komunikasi Dan Industri.

[5] Walz, D., Caplan, S.R., Scriven, D.R.L., Mikulecky, D.C., 1995. Methods of mathematical modelling, Bioelectrochemistry: General Introduction. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7318-5_2.

[6] WHO, 2020. Global Tuberculosis Report 2020. Geneva.

Submitted April 2022, Revised April 2022, Accepted August 2022, Published August 2022