

Model *Susceptible Infected Treatment Recovered Susceptible* dan Aplikasinya pada Data Sifilis di Indonesia

Purnami Widyaningsih^{1*}, Ika Amelia Cahyaningrum², Sutanto³

^{1,2,3}Universitas Sebelas Maret; Jl. Ir Sutami No. 36, Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia

^{1,2,3}Program Studi Matematika Universitas Sebelas Maret

e-mail: purnami_w@staff.uns.ac.id

Diajukan: 27 Mei 2025, Diperbaiki: 8 Maret 2026, Diterima: 27 Maret 2026

Abstrak

Penyakit menular merupakan penyakit yang berpindah-pindah dari satu individu ke individu lain disebabkan bakteri, virus, jamur, atau parasit yang cara penyebarannya secara langsung ataupun tidak langsung. Sifilis adalah penyakit menular yang disebabkan oleh bakteri *Treponema pallidum*. Pada tahun 2018-2022 terjadi 70% peningkatan kasus sifilis di Indonesia. Tujuan penelitian ini memformulasikan model *SITRS* pada penyakit menular, menerapkan model tersebut pada data sifilis di Indonesia, menentukan pola penyebarannya, dan mengidentifikasi keberhasilan target eliminasi sifilis di Indonesia tahun 2030. Metode penelitian yang digunakan adalah studi literatur dan terapan. Model *SITRS* berupa sistem persamaan diferensial nonlinear orde satu. Model diterapkan pada data sifilis di Indonesia berdasarkan data sekunder tahunan 2016-2022 dari Profil Kesehatan Indonesia, *World Bank*, dan Kementerian Kesehatan RI. Data tahun 2016 digunakan untuk nilai awal dan tahun 2017-2020 untuk estimasi parameter sehingga diperoleh model *SITRS* pada penyebaran sifilis di Indonesia. Model tersebut diselesaikan dengan metode Runge-Kutta orde empat. Data tahun 2021-2022 digunakan untuk menghitung keakuratan model menggunakan *MAPE*. Diperoleh nilai *MAPE* sebesar 8,27% sehingga model tersebut sangat akurat untuk menjelaskan penyebaran sifilis di Indonesia. Kasus sifilis di Indonesia pada tahun 2016-2030 mengalami trend naik. Pada tahun 2030, diperkirakan masih terdapat 155.735 penderita sifilis sehingga target eliminasi sifilis di Indonesia diduga belum tercapai. Simulasi dilakukan dengan meningkatkan pengobatan menjadi 90% hingga 100% dan mengurangi kontak dengan penderita sifilis menjadi 0,05%, sehingga target eliminasi Indonesia sifilis tahun 2030 dapat tercapai.

Kata Kunci: penyakit menular, sifilis, model *SITRS*

Abstract

*Infectious diseases are diseases that move from one individual to another due to bacteria, viruses, fungi, or parasites that spread directly or indirectly. Syphilis is an infectious disease caused by the bacteria *Treponema pallidum*. In 2018-2022, there was a 70% increase in syphilis cases in Indonesia. The purpose of this study is to formulate the *SITRS* model in infectious diseases, apply the model to syphilis data in Indonesia, determine the distribution pattern, identify the success of the syphilis elimination target in Indonesia in 2030. The research methods used are literature and applied studies. The *SITRS* model is a system of first-order nonlinear differential equations. The model was applied to syphilis data in Indonesia based on 2016-2022. Data from 2016 was used for initial values and 2017-2020 for parameter estimation to obtain the *SITRS* model on the spread of syphilis in Indonesia. Based on 2021-2022 data, the *MAPE* value obtained was 8.27% so the model is very accurate. Syphilis cases in Indonesia from 2016-2030 experienced an upward trend. In 2030, it is estimated that there will still be 155,735 syphilis sufferers so the syphilis elimination target is not to be achieved. Simulations are carried out by increasing treatment to 90% until 100% and reducing contact with syphilis sufferers to 0,05%, so that the target of syphilis elimination Indonesia in 2030 can be achieved.*

Keywords: infectious disease, syphilis, *SITRS* model

1 Pendahuluan

Penyakit menular merupakan penyakit yang berpindah-pindah dari satu individu ke individu lain disebabkan oleh mikroorganisme yang cara penyebarannya secara langsung maupun tidak langsung [1]. Penyebaran penyakit menular dilihat dari banyaknya individu yang terinfeksi dalam suatu populasi. Upaya penyembuhan penyakit menular dilakukan dengan pengobatan. Individu yang telah berobat dan sembuh dapat kehilangan kekebalannya karena kekebalan yang diperoleh bersifat sementara.

Sifilis adalah penyakit menular yang disebabkan oleh bakteri *Treponema pallidum* berbentuk spiral [2]. Penderita sifilis disembuhkan melalui pengobatan dengan antibiotik seperti *benzathine penicillin G* yang harus diresepkan oleh dokter [2]. Penderita sifilis yang telah sembuh dapat terinfeksi kembali apabila melakukan kontak dengan luka sifilis [3]. Menurut WHO [4], pada tahun 2016, 7 dari setiap 1.000 ibu hamil menderita sifilis sehingga menyebabkan sekitar 143.000 kematian pada janin dan lahir mati serta 109.000 bayi dengan sifilis kongenital di seluruh dunia. Pada tahun 2020, diperkirakan 7,1 juta orang dewasa dengan rentang usia 15-49 tahun tertular sifilis. Berdasarkan laporan Ditjen P2P Kementerian Kesehatan RI [5], tahun 2018-2022 penyebaran sifilis di Indonesia meningkat hampir 70%. Berdasarkan data dari Kementerian Kesehatan RI, pada tahun 2018 terdapat 12.484 kasus sifilis, tahun 2019 terdapat 17.650 kasus, dan terus meningkat hingga tahun 2022 terdapat 20.783 kasus. Upaya pemerintah Indonesia dalam penanggulangan penyebaran sifilis dengan membuat rencana aksi nasional untuk eliminasi HIV AIDS dan penyakit infeksi menular seksual pada tahun 2030 [6].

Penyebaran penyakit menular direpresentasikan dengan model matematika yaitu model *susceptible infected recovered (SIR)*. Penelitian sebelumnya model *SIR* diformulasikan pertama kali oleh Kermack dan McKendrick [7] dan diformulasikan ulang oleh Hethcote [8] untuk diterapkan pada penyebaran penyakit menular seperti campak, difteri, cacar air, dan polio. Pada model ini, populasi dikategorikan menjadi tiga kelompok yaitu *susceptible (S)* atau rentan, *infected (I)* atau terinfeksi, dan *recovered (R)* atau sembuh. Model *SIR* juga diteliti dan diterapkan pada penyebaran campak oleh Utari [9] pada tahun 2019, COVID-19 oleh El Kharrazi *et al.* [10] pada tahun 2021, dan cacar monyet oleh Al-Temimi dan Al-Shammrty [11] pada tahun 2022. Penelitian sebelumnya model *susceptible infected treatment recovered (SITR)* telah diformulasikan oleh Sacrifice *et al.* [12] pada tahun 2015 dengan mempertimbangkan pengobatan sehingga individu terinfeksi yang berobat dikelompokkan menjadi kelompok individu *treatment (T)* dan diterapkan pada penyebaran penyakit hepatitis B. Selain itu, model *SITR* juga diteliti dan diterapkan pada penyebaran tuberkulosis oleh Side dkk. [13] pada tahun 2016 dan ebola oleh Buyuktahtakin *et al.* [14] pada tahun 2018.

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, kebaruan dari penelitian ini adalah individu kelompok R dapat kembali menjadi individu yang rentan terinfeksi (S) karena memiliki kekebalan sementara. Penelitian ini bertujuan untuk memformulasikan model penyebaran penyakit menular yaitu model *susceptible infected treatment recovered susceptible* (*SITRS*). Kemudian, model *SITRS* diterapkan pada data sifilis di Indonesia, ditentukan pola penyebarannya, dan diidentifikasi keberhasilan target eliminasi sifilis di Indonesia pada tahun 2030.

2 Metode Penelitian

2.1 Model Penyebaran Penyakit Menular

Pada model SIR, Hethcote [8] mengasumsikan populasi bernilai konstan N tanpa mempertimbangkan faktor migrasi sehingga laju kelahiran dan kematian bernilai sama yaitu μ . Banyaknya kelahiran bernilai μN sehingga individu kelompok S bertambah μN . Pada masing-masing kelompok individu terdapat kematian sehingga individu kelompok S , I , dan R berkurang sebesar μS , μI , dan μR . Individu kelompok S terinfeksi penyakit setelah melakukan kontak dengan individu kelompok I . Jika β adalah laju kontak maka banyaknya individu kelompok S berkurang $\beta \frac{SI}{N}$. Dengan demikian, perubahan sesaat banyaknya individu kelompok S ditulis sebagai

$$\frac{dS}{dt} = \mu N - \beta \frac{SI}{N} - \mu S \quad (1)$$

Jika β adalah laju kontak maka banyaknya individu kelompok I bertambah sebesar $\beta \frac{SI}{N}$. Individu yang telah terinfeksi memiliki kemungkinan untuk sembuh (R). Jika γ adalah laju kesembuhan maka banyaknya individu kelompok I berkurang sebesar γI dan banyaknya individu kelompok R bertambah sebesar γI . Perubahan sesaat banyaknya individu kelompok I dan R ditulis sebagai

$$\frac{dI}{dt} = \beta \frac{SI}{N} - \gamma I - \mu I \quad (2)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I - \mu R \quad (3)$$

Upaya penyembuhan penyakit menular dilakukan melalui pengobatan. Individu terinfeksi diasumsikan harus berobat agar sembuh. Individu terinfeksi yang berobat dikelompokkan menjadi kelompok individu *treatment* (T). Jika laju pengobatan dinotasikan dengan λ maka banyaknya individu kelompok I yang berobat sebanyak λI . Hal ini menyebabkan banyaknya individu kelompok I berkurang sebanyak λI dan banyaknya individu kelompok T bertambah sebanyak λI .

Individu kelompok T dinyatakan sembuh karena telah memperoleh kekebalan. Jika laju kesembuhan karena pengobatan dinotasikan dengan δ maka banyaknya individu berobat yang sembuh sebanyak δT . Hal ini menyebabkan banyaknya individu kelompok T berkurang sebanyak δT dan banyaknya individu kelompok R bertambah sebanyak δT . Pada tahun 2016, Side dkk. [13] memformulasikan model $SITR$ dengan asumsi kematian karena penyakit dipertimbangkan. Jika laju α adalah laju kematian karena penyakit maka banyaknya individu meninggal karena penyakit sebanyak αI . Hal ini menyebabkan banyaknya individu kelompok I berkurang sebanyak αI . Perubahan sesaat banyaknya individu kelompok T , I , dan R ditulis sebagai

$$\frac{dT}{dt} = \lambda I - \mu T - \delta T \quad (4)$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta \frac{SI}{N} - \mu I - \lambda I \quad (5)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I - \alpha I - \mu R \quad (6)$$

2.2 Data Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder tahunan dari Profil Kesehatan Indonesia [15], *World Bank* [16], dan Kementerian Kesehatan RI [17] pada tahun 2016-2022. Dari Profil Kesehatan Indonesia [15] diperoleh data banyaknya penduduk di Indonesia. Dari *World Bank* [16] diperoleh data *crude birth rate (CBR)* dan *crude death rate (CDR)*. Data *CBR* menyatakan banyaknya kelahiran pada tahun t per 1.000 penduduk, angka ini digunakan untuk memperkirakan jumlah kelahiran dalam suatu populasi. Data *CDR* menyatakan banyaknya individu meninggal pada tahun t per 1.000 penduduk, angka ini digunakan untuk memperkirakan jumlah kematian dalam suatu populasi. Dari Kementerian Kesehatan RI [17] diperoleh data banyaknya kasus baru sifilis dan banyaknya individu penderita sifilis yang berobat.

Pada penelitian ini, perlu diketahui data banyaknya individu yang sembuh dari sifilis. Namun, data yang diperlukan tidak tersedia. Menurut Clement *et al.* [18], obat sifilis yang sering digunakan adalah *benzathine penicillin* dengan persentase keberhasilan pengobatan sebesar 95%. Oleh karena itu, ditentukan banyaknya individu kelompok R pada tahun t dengan persentase keberhasilan pengobatan dan banyaknya individu kelompok T .

2.3 Estimasi Parameter

Berdasarkan data yang diperoleh, untuk mendapatkan nilai parameter dilakukan estimasi. Estimasi bertujuan untuk memperkirakan nilai parameter dengan data sampel dari seluruh populasi. Pada penelitian ini, dilakukan estimasi parameter berdasarkan data sekunder tahun 2017-

2020. Metode estimasi parameter yang digunakan adalah rata-rata (*mean*). Rumus rata-rata (*mean*) ditulis sebagai

$$\bar{x} = \frac{\sum_{t=1}^n x_t}{n} \quad (7)$$

dengan

\bar{x} : nilai rata-rata,

x_t : data pada saat t , dan

n : banyaknya data yang digunakan.

Pada penelitian ini, estimasi parameter θ diperoleh dari rata-rata banyaknya kelahiran dan banyaknya penduduk Indonesia. Parameter μ diperoleh dari rata-rata banyaknya kematian dan banyaknya penduduk Indonesia. Parameter β diperoleh dari rata-rata banyaknya kasus sifilis dan banyaknya penduduk Indonesia. Parameter λ diperoleh dari rata-rata banyaknya penderita sifilis yang berobat dan banyaknya penderita sifilis. Parameter δ diperoleh dari rata-rata persentase keberhasilan pengobatan. Parameter σ diperoleh dari asumsi semua penderita sifilis yang telah sembuh dapat kembali rentan terinfeksi kembali.

2.4 Metode Runge-Kutta Orde Empat

Penyelesaian persamaan diferensial biasa dengan menggunakan metode Runge-Kutta. Metode Runge-Kutta adalah metode numerik satu langkah (*single-step*) yang digunakan untuk menyelesaikan PDB dengan masalah nilai awal. Tidak semua fungsi mudah untuk dihitung turunannya terutama pada fungsi yang bentuknya rumit. Oleh karena itu, digunakan metode Runge-Kutta agar tidak memerlukan perhitungan turunan dari model *SITRS*. Metode Runge-Kutta orde empat memiliki tingkat keakuratan yang lebih tinggi dibandingkan metode Runge-Kutta orde sebelumnya. Menurut Atkinson [19], metode Runge-Kutta orde empat ditulis sebagai

$$\mathbf{x}^{[i+1]} = \mathbf{x}^{[i]} + \frac{h}{6} (\mathbf{k}_1 + 2\mathbf{k}_2 + 2\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4) \quad (8)$$

dengan

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_1 &= \mathbf{f}(t_i, \mathbf{x}^{[i]}), \\ \mathbf{k}_2 &= \mathbf{f}\left(t_i + \frac{h}{2}, \mathbf{x}^{[i]} + \frac{h}{2}\mathbf{k}_1\right), \\ \mathbf{k}_3 &= \mathbf{f}\left(t_i + \frac{h}{2}, \mathbf{x}^{[i]} + \frac{h}{2}\mathbf{k}_2\right), \\ \mathbf{k}_4 &= \mathbf{f}(t_i + h, \mathbf{x}^{[i]} + h\mathbf{k}_3). \end{aligned}$$

untuk $i = 0, 1, 2, \dots$ dan h merupakan panjang langkah. Nilai \mathbf{k} berhubungan secara rekurensi, artinya \mathbf{k}_1 muncul dalam persamaan untuk \mathbf{k}_2 , muncul dalam persamaan \mathbf{k}_3 , dan seterusnya. Pada penelitian ini, untuk memberikan 1 langkah pada setiap tahunnya diambil nilai $h = 1$. Oleh karena itu, diperoleh hasil solusi numerik pada model *SITRS* menggunakan metode Runge-Kutta orde empat pada persamaan berikut.

$$S^{[i+1]} = S^{[i]} + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$I^{[i+1]} = I^{[i]} + \frac{1}{6}(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4)$$

$$T^{[i+1]} = T^{[i]} + \frac{1}{6}(m_1 + 2m_2 + 2m_3 + m_4)$$

$$R^{[i+1]} = R^{[i]} + \frac{1}{6}(n_1 + 2n_2 + 2n_3 + n_4)$$

2.5 Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

Nilai prediksi telah ditentukan menggunakan metode Runge-Kutta orde empat di atas. Selanjutnya, untuk mengetahui nilai keakuratan dari data aktual dengan data pendekatan yang telah diperoleh dari perhitungan Runge-Kutta orde empat dibutuhkan metode evaluasi keakuratan. Metode evaluasi keakuratan yang digunakan pada penelitian ini adalah *MAPE*. *MAPE* merupakan rata-rata absolut antara data aktual dan data prediksi yang dinyatakan dalam persentase. *MAPE* pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui keakuratan model *SITRS* antara data aktual dan data pendekatan. Menurut Lewis [20], rumus *MAPE* ditulis sebagai

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{x_t - \hat{x}_t}{x_t} \right| 100\% \quad (9)$$

dengan

n : banyaknya data yang digunakan,

x_t : data pada saat t , dan

\hat{x}_t : nilai penyelesaian pendekatan model pada saat t

Menurut Lewis [20], kriteria keakuratan model berdasarkan nilai *MAPE* ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria Keakuratan Model Berdasarkan Nilai *MAPE*

Nilai <i>MAPE</i>	Kriteria Keakuratan Model
$MAPE < 10\%$	Sangat akurat
$10\% < MAPE < 20\%$	Akurat
$20\% < MAPE < 50\%$	Cukup akurat
$MAPE \geq 50\%$	Tidak Akurat

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Formulasi Model *SITRS*

Model *SIR* digunakan sebagai dasar dalam memformulasikan model *SITRS* pada penelitian ini. Berbeda dengan Hethcote [8], di mana populasi diasumsikan konstan sebesar N , pada penelitian ini populasi diasumsikan tidak konstan sebesar $N(t)$ yang selanjutnya ditulis N sehingga laju kelahiran bernilai tidak sama dengan laju kematian. Laju kelahiran μ diubah menjadi θ sehingga banyaknya kelahiran sebesar θN . Perubahan sesaat banyaknya individu kelompok S menjadi

$$\frac{dS}{dt} = \theta N - \beta \frac{SI}{N} - \mu S \quad (10)$$

Pada tahun 2016, Side dkk. [13] memformulasikan model *SITR* dengan asumsi kematian karena penyakit dipertimbangkan. Namun, terdapat penyakit yang tidak menyebabkan kematian saat terinfeksi seperti sifilis dan gonore. Berbeda dengan Side dkk. [13], pada penelitian ini diasumsikan tidak ada kematian karena penyakit. Perubahan sesaat banyaknya individu kelompok T dan I menjadi

$$\frac{dT}{dt} = \lambda I - \mu T - \delta T \quad (11)$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta \frac{SI}{N} - \mu I - \lambda I \quad (12)$$

Individu kelompok R diasumsikan memperoleh kekebalan sementara sehingga saat kekebalan yang diperoleh telah hilang, individu tersebut kembali rentan terinfeksi dan menjadi individu kelompok S . Jika laju kehilangan kekebalan dinotasikan dengan σ maka banyaknya individu kelompok R yang kehilangan kekebalan sebanyak σR . Hal ini menyebabkan individu kelompok R

berkurang sebanyak σR dan individu kelompok S bertambah sebanyak σR . Perubahan sesaat banyaknya individu kelompok S dan R mengalami perubahan sehingga menjadi

$$\frac{dS}{dt} = \theta N - \beta \frac{SI}{N} - \mu S + \sigma R \tag{13}$$

$$\frac{dR}{dt} = \delta T - \mu R - \sigma R \tag{14}$$

Dengan demikian, diperoleh formula model *SITRS* pada penyebaran penyakit menular yakni

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \theta N - \beta \frac{SI}{N} - \mu S + \sigma R \\ \frac{dI}{dt} &= \beta \frac{SI}{N} - (\mu + \lambda)I \\ \frac{dT}{dt} &= \lambda I - (\mu + \delta)T \\ \frac{dR}{dt} &= \delta T - (\mu + \sigma)R \end{aligned} \tag{15}$$

dengan $S(0) \geq 0, I(0) > 0, T(0) \geq 0, R(0) \geq 0$, dan $\theta, \mu, \beta, \lambda, \delta, \sigma > 0$. Keenam parameter tersebut adalah laju kelahiran, laju kematian, laju kontak, laju pengobatan, laju kesembuhan karena pengobatan, dan laju kehilangan kekebalan. Model *SITRS* (15) berupa sistem persamaan diferensial nonlinear orde satu dengan variabel bebas t dan variabel terikat S, I, T , dan R .

3.2 Penerapan

Model (15) diterapkan pada data penyebaran penyakit sifilis di Indonesia. Data yang digunakan yakni data sekunder tahunan 2016-2022 yang bersumber dari Profil Kesehatan Indonesia [15], *World Bank* [16], dan Kementerian Kesehatan RI [17]. Data tahun 2017-2020 digunakan untuk mengestimasi nilai parameter. Estimasi nilai parameter dengan rata-rata dari data sekunder tahun 2017-2020 sebagai ukuran pemusatan dalam menentukan laju pada masing-masing parameter. Nilai estimasi enam parameter ditunjukkan melalui Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Estimasi Enam Parameter Model *SITRS* pada Penyebaran Sifilis di Indonesia dan Notasinya

Parameter	Notasi	Nilai Estimasi
Laju kelahiran	θ	0,017064
Laju kematian	μ	0,007895
Laju kontak	β	0,687238
Laju pengobatan	λ	0,497767

Laju kesembuhan karena pengobatan	δ	0,950000
Laju kehilangan kekebalan	σ	1,000000

Laju pengobatan, λ , diestimasi dari rata-rata banyaknya individu yang berobat dibagi dengan banyaknya individu terinfeksi pada tahun 2017-2020. Nilai estimasi laju pengobatan adalah $0,497767 \approx 0,49777$ yang berarti dari 100.000 penderita sifilis terdapat 49.777 individu yang berobat.

Dengan demikian, berdasarkan Tabel 2 diperoleh model *SITRS* pada penyebaran sifilis di Indonesia, yaitu

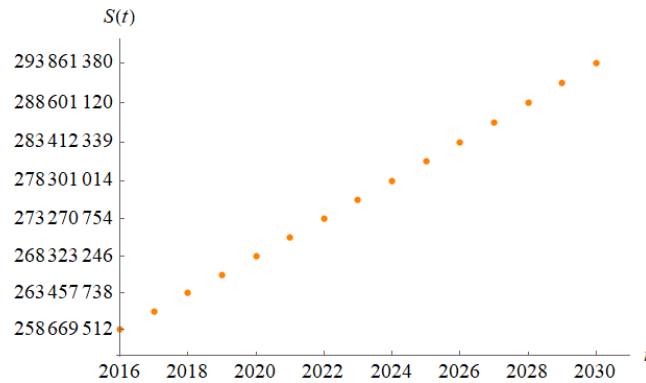
$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= 0,017064N - 0,687238 \frac{SI}{N} - 0,007895S + 1,000000R \\
 \frac{dI}{dt} &= 0,687238 \frac{SI}{N} - 0,505662I \\
 \frac{dT}{dt} &= 0,497767I - 0,957895T \\
 \frac{dR}{dt} &= 0,950000T - 1,007895R
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

dengan $S(0) \geq 0, I(0) > 0, T(0) \geq 0$, dan $R(0) \geq 0$.

Model (16) diberi nilai awal. Nilai awal yang digunakan mengacu pada banyaknya individu S, I, T , dan R pada data penyakit sifilis tahun 2016, yaitu

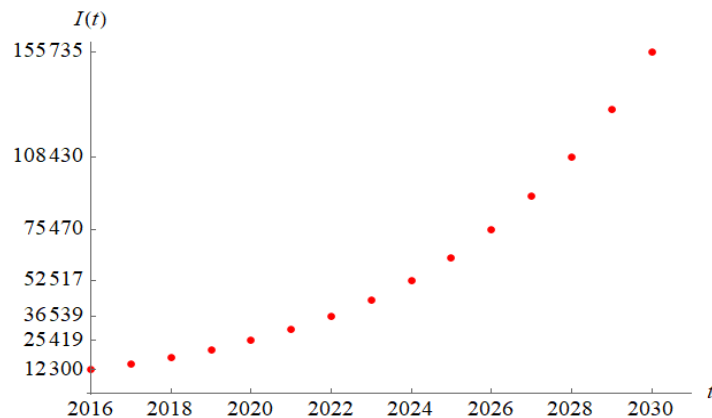
$$\begin{aligned}
 S(0) &= 258.669.512, & I(0) &= 12.300, \\
 T(0) &= 11.884, & R(0) &= 11.290
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Penyelesaian sistem masalah nilai awal (16)-(17) ditentukan dengan metode Runge-Kutta orde empat. Dengan data tahun 2021-2022 dan penyelesaian model diperoleh nilai *MAPE* sebesar 8,27% sehingga mengacu pada Lewis [20], model (16) sangat akurat. Berdasarkan penyelesaian model, diperoleh pola penyebaran penyakit sifilis di Indonesia tahun 2016-2030 yang ditunjukkan melalui *scatterplot* pada Gambar 1, Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4.



Gambar 1. Scatterplot Banyaknya Individu Kelompok S pada Tahun 2016-2030

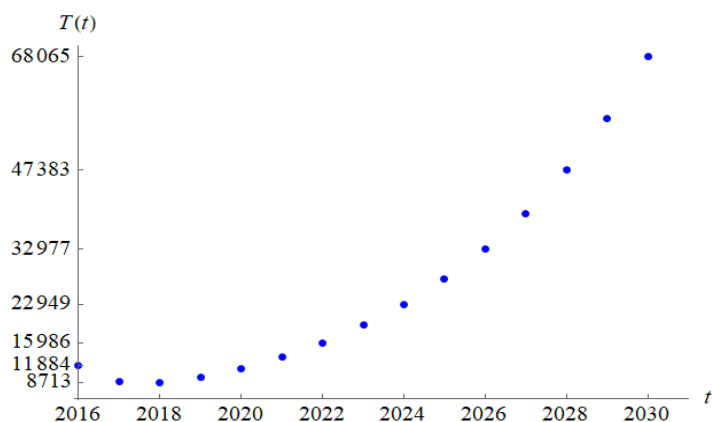
Berdasarkan Gambar 1, terlihat bahwa banyaknya individu kelompok S pada tahun 2016-2030 meningkat dari 258.669.512 menjadi 293.861.380 individu. Peningkatan ini terjadi karena individu kelompok R memperoleh kekebalan yang hanya sementara sehingga saat kekebalan telah hilang dapat kembali menjadi individu rentan terinfeksi dan dikelompokkan menjadi kelompok individu S . Selain itu, peningkatan terjadi karena laju kelahiran di Indonesia lebih tinggi dibandingkan laju kematian pada kelompok individu S . Dengan demikian, banyaknya individu kelompok S menunjukkan trend naik. Selanjutnya, scatterplot banyaknya individu kelompok I ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Scatterplot Banyaknya Individu Kelompok I pada Tahun 2016-2030

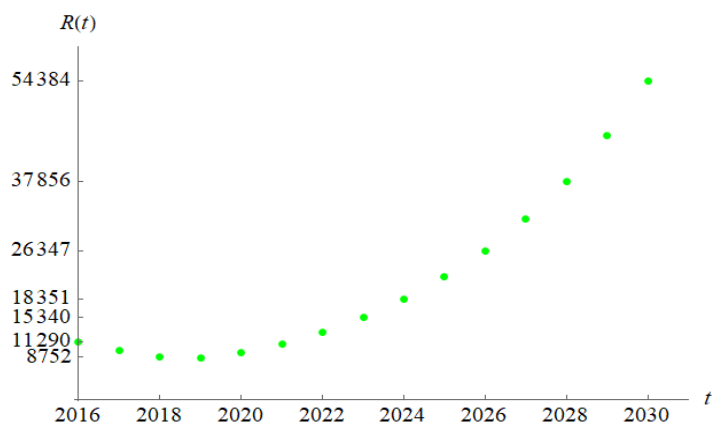
Berdasarkan Gambar 2, terlihat bahwa banyaknya individu kelompok I pada tahun 2016-2030 meningkat dari 12.300 menjadi 155.735 individu. Peningkatan banyaknya individu kelompok I berakibat pada semakin banyak kontak yang terjadi antara individu kelompok S dan I sehingga individu kelompok S terinfeksi dan dikelompokkan menjadi kelompok individu I . Selain itu, peningkatan ini terjadi karena penderita sifilis yang berobat lebih sedikit dibandingkan kasus baru sifilis. Dengan demikian, banyaknya individu kelompok I menunjukkan trend naik. Selain itu, diduga masih terdapat 155.735 penderita sifilis pada tahun 2030 sehingga target eliminasi

sifilis di Indonesia belum tercapai. Selanjutnya, *scatterplot* banyaknya individu kelompok T ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. *Scatterplot* Banyaknya Individu Kelompok T pada Tahun 2016-2030

Berdasarkan Gambar 3, terlihat bahwa banyaknya individu kelompok T pada tahun 2016-2030 meningkat dari 11.884 menjadi 68.065 individu. Peningkatan individu kelompok T dipengaruhi oleh individu kelompok I . Hal tersebut dikarenakan semakin banyak individu kelompok I yang melakukan pengobatan agar sembuh. Dengan demikian, banyaknya individu kelompok T menunjukkan trend naik. Selanjutnya, *scatterplot* banyaknya individu kelompok R ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. *Scatterplot* Banyaknya Individu Kelompok R pada Tahun 2016-2030

Berdasarkan Gambar 4, terlihat bahwa banyaknya individu kelompok R pada tahun 2016-2030 meningkat dari 11.290 menjadi 54.384 individu. Peningkatan ini terjadi karena individu kelompok I yang berobat dinyatakan sembuh dari penyakit sifilis sehingga menjadi individu kelompok R . Dengan demikian, banyaknya individu kelompok R menunjukkan trend naik.

3.3 Simulasi

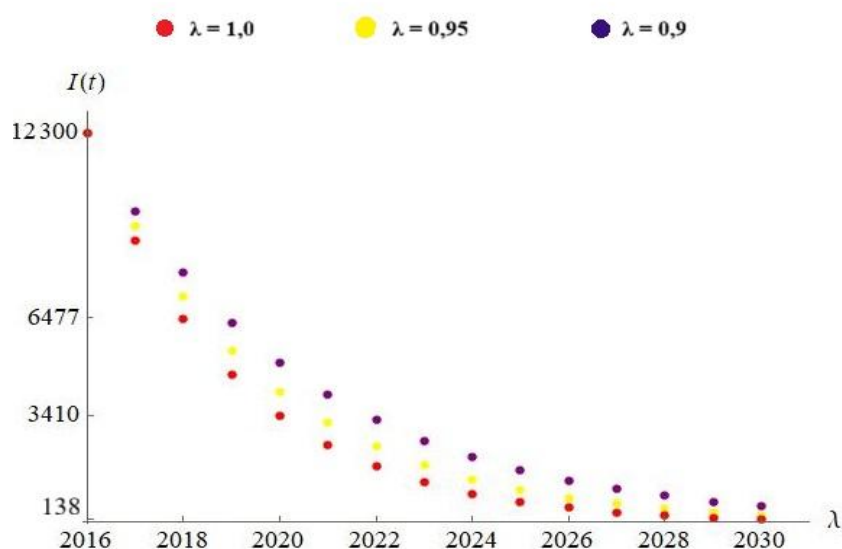
Target eliminasi sifilis di Indonesia belum tercapai sehingga untuk mengetahui nilai parameter yang menyebabkan target eliminasi sifilis di Indonesia tercapai pada tahun 2030 perlu dilakukan simulasi parameter. Simulasi dilakukan dengan mengubah nilai parameter yang memengaruhi banyaknya individu kelompok I dengan cara meningkatkan pengobatan dan mengurangi kontak. Nilai laju pengobatan (λ) dinaikkan dengan cara memperbanyak jumlah individu terinfeksi sifilis yang berobat. Nilai laju kontak (β) diturunkan dengan cara membatasi kontak dengan individu yang terinfeksi sifilis.

Simulasi pertama dilakukan dengan menaikkan laju pengobatan (λ) sementara parameter lainnya tetap. Berdasarkan WHO [21], ditargetkan kasus sifilis turun sebanyak 90% pada tahun 2030. Penyakit sifilis diketahui hanya dapat sembuh dengan pengobatan sehingga untuk mencapai target tersebut individu kelompok I harus berobat. Oleh karena itu, laju parameter λ disimulasikan dengan nilai $\lambda = 0,9$. Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan [22], pada tahun 2030 ditargetkan terdapat 100% ibu hamil penderita sifilis telah melakukan pengobatan dan 95% anak dari ibu penderita sifilis. Oleh karena itu, laju parameter λ disimulasikan dengan nilai $\lambda = 1,0$ dan $\lambda = 0,95$. Simulasi ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Banyaknya Individu Kelompok I Berdasarkan Simulasi λ

t	λ			
	0,497767	0,9	0,95	1,0
2020	25.419	5.087	4.165	3.410
2025	62.957	1.688	1.076	686
2030	155.735	560	278	138

Berdasarkan Tabel 3, terlihat bahwa simulasi nilai λ dinaikkan menjadi 0,9, 0,95, dan 1,0 sementara parameter lainnya tetap. Terlihat bahwa, saat nilai λ dinaikkan menjadi 0,9, 0,95, dan 1,0 penderita sifilis menurun. Oleh karena itu, berdasarkan simulasi dengan menaikkan nilai sesuai target dari WHO maupun Peraturan Menteri Kesehatan target eliminasi sifilis di Indonesia tercapai pada tahun 2030. Selanjutnya, *scatterplot* banyaknya individu kelompok I saat simulasi nilai $\lambda = 0,9, 0,95, \text{ dan } 1,0$ ditunjukkan pada Gambar 5.



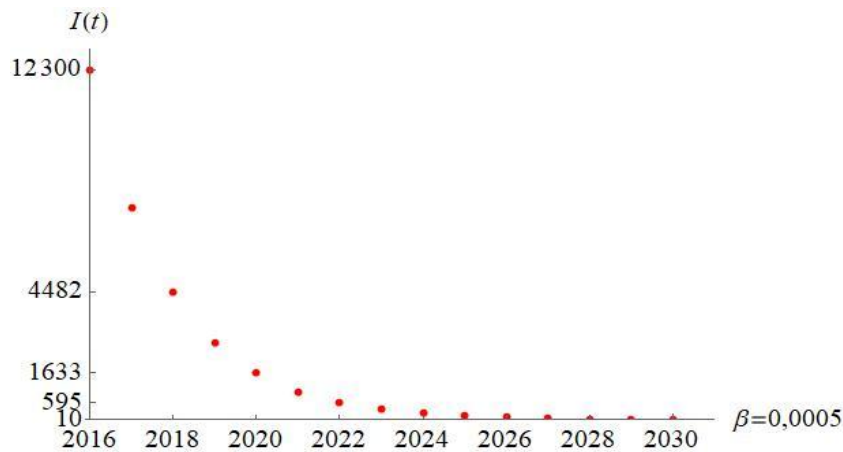
Gambar 5. Scatterplot Banyaknya Individu Kelompok I pada Tahun 2016-2030 saat Nilai $\lambda = 0,9$, $\lambda = 0,95$, dan $\lambda = 1,0$

Simulasi kedua dilakukan dengan menurunkan laju kontak (β) sementara parameter lainnya tetap. Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan [22], pada tahun 2030 ditargetkan terdapat 50 kasus sifilis dari 100.000 kelahiran hidup. Oleh karena itu, laju parameter β disimulasikan dengan nilai 0,0005. Banyaknya individu kelompok I berdasarkan simulasi β ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Banyaknya Individu Kelompok I Berdasarkan Simulasi β

t	β	
	0,687238	0,0005
2020	25.419	1.633
2025	62.957	131
2030	155.735	10

Berdasarkan Tabel 4, terlihat bahwa simulasi nilai β diturunkan menjadi 0,0005 sementara parameter lainnya tetap. Pada saat $\beta = 0,0005$ penderita sifilis turun terdapat 10 penderita sifilis. Oleh karena itu, berdasarkan simulasi dengan menurunkan nilai $\beta = 0,0005$. Oleh karena itu, berdasarkan simulasi dengan menurunkan nilai sesuai target Peraturan Menteri Kesehatan target eliminasi sifilis di Indonesia tercapai pada tahun 2030. Selanjutnya, scatterplot banyaknya individu kelompok I saat simulasi nilai $\beta = 0,0005$ ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Scatterplot Banyaknya Individu Kelompok I pada Tahun 2016-2030 saat Nilai $\beta = 0,0005$

4 Simpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan, disimpulkan bahwa model *SITRS* pada penyebaran penyakit menular adalah model (15) yang berupa sistem persamaan diferensial nonlinear orde satu dengan variabel bebas t dan variabel terikat S , I , T , dan R . Model *SITRS* pada penyebaran sifilis di Indonesia adalah model (16) yang sangat akurat. Pola penyebaran penyakit sifilis di Indonesia menunjukkan banyaknya individu rentan, individu yang terinfeksi sifilis, individu yang berobat, dan individu yang sembuh mengalami trend naik pada tahun 2016-2030. Pada tahun 2030, di Indonesia diduga masih terdapat 155.735 penderita sifilis sehingga target eliminasi sifilis di Indonesia belum tercapai. Indonesia dapat mencapai target eliminasi sifilis dengan meningkatkan pengobatan 90% hingga 100% dan mengurangi kontak dengan penderita sifilis 0,05% sehingga target tersebut dapat tercapai pada tahun 2030.

5 Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Grup Riset *Mathematical Modelling, Data Science, & Scientific Machine Learning* atas dukungan moral dan kritik yang membangun dalam perbaikan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada RKAT Universitas Sebelas Maret Tahun Anggaran 2025 melalui Skema Penelitian PENGUATAN KAPASITAS KELOMPOK RISET (PKGR-UNS) B dengan Surat Perjanjian Penugasan Penelitian Nomor 371/UN27.22/PT.01.03/2025.

6 Daftar Pustaka

- [1] WHO, “Communicable Diseases,” 2023. <https://www.afro.who.int/health-topics/communicable-diseases>.
- [2] E. Trovato, L. Tognetti, M. Campoli, E. Cinotti, and P. Rubegni, “Syphilis Diagnosis and Treatment: State of The Art,” *Eur. Med. J.*, no. March, 2021, doi: 10.33590/emj/20-00221.
- [3] S. R. Binder and E. S. Theel, “Syphilis testing algorithms: A review,” *World J. Immunol.*, vol. 6, no. 1, p. 1, 2016, doi: 10.5411/wji.v6.i1.1.
- [4] WHO, “Syphilis.” <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/syphilis>.
- [5] Kementerian Kesehatan RI, “Kasus HIV dan Sifilis Meningkat, Penularan Didominasi Ibu Rumah Tangga,” 2023. <https://p2p.kemkes.go.id/kasus-hiv-dan-sifilis-meningkat-penularandidominasi-ibu-rumah-tangga>.
- [6] Kementerian Kesehatan RI, *Rencana Aksi Kegiatan Pencegahan dan Pengendalian Penyakit Menular Langsung Tahun 2020-2024*. Jakarta, 2020.
- [7] W. Kermack and A. McKendrick, “A contribution to the mathematical theory of epidemics. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and physical Character, Vol. 115, No. 772.,” *Society*, vol. 115, no. 772, pp. 700–721, 1927.
- [8] H. W. Hethcote, “Three Basic Epidemiological Models,” pp. 119–144, 1989, doi: 10.1007/978-3-642-61317-3_5.
- [9] I. A. Putu Ari Utari, “Kontrol Optimal Upaya Pengobatan Penyakit Campak Menggunakan Model Endemi SIR,” *J. Mat.*, vol. 9, no. 2, p. 94, 2019, doi: 10.24843/jmat.2019.v09.i02.p115.
- [10] Z. El Kharrazi and S. Saoud, “Simulation of COVID-19 epidemic spread using Stochastic Differential Equations with Jump diffusion for SIR Model,” *2021 Int. Conf. Optim. Appl. ICOA 2021*, 2021, doi: 10.1109/ICOA51614.2021.9442639.
- [11] S. A. S. Al-temimi and H. S. N. Al-shammrty, “Estimate the Endemic (SIR) Model of Monkey Pox Disease,” *Math. Stat. Eng. Appl.*, vol. 71, no. 4, pp. 4921–4935, 2022.
- [12] N.-K. Sacrifice, E. Okyere, J. D.-G. Frempong, Nana Kena Akindeinde, Saheed Ojo Ankamah, and D. Agyen, James Kwaku Adedia, “An SITR analysis of treatment model of Hepatitis B epidemic,” *J. Math. Theory Model.*, vol. 5, no. 13, pp. 120–132, 2015.
- [13] S. Side, W. Sanusi, and N. F. Setiawan, “Analisis dan Simulasi Model SITR pada Penyebaran Penyakit Tuberkulosis di Kota Makassar Analysis and Simulation Of SITR Model on Tuberculosis in Makassar City,” *J. Sainsmat*, vol. V, no. 2, pp. 191–204, 2016.
- [14] E. Büyüktaktın, E. des-Bordes, and E. Y. Kılış, “A new epidemics–logistics model:

- Insights into controlling the Ebola virus disease in West Africa,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 265, no. 3, pp. 1046–1063, 2018, doi: 10.1016/j.ejor.2017.08.037.
- [15] Pusat Data dan Informasi, *Profil Kesehatan Indonesia*. Jakarta: Kementerian Kesehatan RI, 2016.
- [16] World Bank, “Birth and Death Rate, Crude,” 2023. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.DYN.CBRT.IN>.
- [17] Kementerian Kesehatan RI, *Laporan Perkembangan HIV AIDS & Penyakit Infeksi Menular Seksual (PIMS) Triwulan IV Tahun 2016-2022*. Jakarta, 2017.
- [18] C. B. Clement, M. E., Okeke, N. L., and Hicks, “Treatment of Syphilis: A Systematic Review,” *JAMA*, vol. 312, pp. 1905–1917, 2014.
- [19] K. E. Atkinson, *Introduction to Numerical Analysis*. USA: New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 1989.
- [20] C. D. Lewis, *Industrial and Business Forecasting Methods: A Practical Guide to Exponential Smoothing and Curve Fitting*. Butterworth-Heinemann, 1982.
- [21] WHO, “New study highlights unacceptably high global prevalence of syphilis among men who have sex with men,” 2021. <https://www.who.int/news/item/09-07-2021-new-study-highlights-unacceptably-high-global-prevalence-of-syphilis-among-men-who-have-sex-with-men>.
- [22] Kementerian Kesehatan RI, “Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 52 Tahun 2017 Tentang Eliminasi Penularan Human Deficiency Virus, Sifilis Dan Hepatitis B Dari Ibu Ke Anak,” *Prog. Phys. Geogr.*, vol. 14, no. 7, p. 450, 2017, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01514176>.