

BAB 4. MODEL PENYEBARAN COVID-19 DENGAN MEMPERTIMBANGKAN PENYAKIT BAWAAN DAN PEMBERIAN VAKSIN

Wela Asmi¹ dan Yudi Ari Adi²

Program Studi Matematika, Fakultas Sains dan Teknologi Terapan,
Universitas Ahmad Dahlan

Email : wela1700015059@webmail.uad.ac.id¹

DOI: <https://doi.org/10.15294/mtk.v1i1.94>

Abstrak. Kami tertarik untuk mengamati peran vaksin dalam membatasi penyebaran COVID-19. Kami menyoroti fakta bahwa program vaksinasi dapat mengurangi resiko penyakit COVID-19. Namun demikian, pada tahap awal program vaksinasi tidak diberikan kepada penderita penyakit kronis. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis dan menginterpretasikan simulasi model matematika terhadap penyebaran COVID-19 dengan mempertimbangkan penyakit bawaan dan vaksinasi. Pada tulisan ini kami menyusun model matematika penyebaran COVID-19 dengan membedakan individu rentan menjadi dua kelompok, yaitu tanpa dan dengan penyakit bawaan berbasis model epidemik SIR. Populasi dibagi menjadi empat kelas, yaitu populasi susceptible tanpa penyakit bawaan, susceptible dengan penyakit bawaan, terinfeksi, dan sembuh. Selanjutnya model diaplikasikan pada data di Provinsi Sumatera Barat. Dari hasil analisis didapatkan bahwa parameter yang paling berpengaruh dalam penyebaran COVID-19 adalah laju infeksi penyakit dan laju kematian alami. Selain itu untuk menghambat penyebaran COVID-19 sangat bergantung pada tingkat efektifitas vaksinasi.

Kata kunci: COVID-19, model SIR, Sumatera Barat

PENDAHULUAN

Virus corona atau Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) adalah suatu virus yang dapat

menyerang sistem pernapasan manusia (Bao et al., 2020). Infeksi virus ini disebut Corona Virus Disease 2019 (COVID-19) (Shereen et al., 2020). Virus corona dapat menimbulkan beberapa gangguan seperti (gangguan ringan pada sistem pernapasan, infeksi paru yang berat dan juga bisa mengakibatkan kematian) (Jin et al., 2020). Infeksi virus corona pertama kali ditemukan di Kota Wuhan, China pada akhir Desember 2019 (Roosa et al., 2020). Dalam waktu yang cukup singkat virus corona dapat menular dengan cepat melalui penularan dari manusia ke manusia maupun benda yang terdapat virus ini kemudian menyebar hampir ke semua negara salah satunya Indonesia hanya dalam kurun waktu beberapa bulan saja (Zareh Gavgani, 2020). Sampai dengan 30 Agustus 2021 di seluruh dunia tercatat sebanyak 220.567.887 kasus positif COVID-19 dengan 4.579.070 meninggal dunia. Sedangkan di Indonesia kasus positif COVID-19 mencapai 4.129.020 dengan 135.861 meninggal dunia (<https://covid19.who.int/>).

Pertumbuhan kasus COVID-19 yang terjadi di Sumatera Barat terlebih khususnya di Kota Padang juga terus mengalami kenaikan. Jumlah kasus positif yang terhitung dari bulan Juli hingga bulan Agustus 2021 sebesar 1.113 kasus. Kasus positif COVID-19 yang terjadi di Kota Padang dari bulan September hingga bulan Oktober 2021 bertambah sebanyak 647 kasus. Dalam kurun waktu yang kurang dari 2 bulan sudah bertambah menjadi 1.760 kasus positif. Hal yang sama juga terjadi kenaikan kasus positif untuk Kabupaten/Kota lainnya di Provinsi Sumatera Barat. Jumlah kasus positif di Sumatera Barat untuk keseluruhan yang terhitung sampai bulan agustus sebesar 3.502 kasus (Website Corona Sumbang).

Pemodelan penyebaran penyakit menular atau dikenal sebagai model epidemik, pertama kali dikenalkan pada tahun 1927 oleh Kermack dan Mckendrik yang membahas tentang model SIR (*Susceptible - Infected - Recovered*) yang menggambarkan interaksi antara individu-individu rentan, individu terinfeksi, dan individu sembuh. Sebagai ukuran penyebaran penyakit dikenal istilah bilangan reproduksi dasar yang digunakan untuk menentukan

apakah suatu populasi bebas atau terinfeksi penyakit. Setelah memperoleh model matematika yang dibentuk barulah dapat diselesaikan secara sistematis, dan dapat diaplikasikan lagi dalam masalah nyata.

Pada tulisan ini akan dikembangkan model matematika penyebaran penyakit COVID-19 dengan pemberian vaksin. Model matematika yang dibentuk adalah model matematika $SSbIR$, dimana populasi yang diberikan terbagi dalam empat subpopulasi yaitu populasi rentan tanpa penyakit bawaan (S), populasi rentan dengan penyakit bawaan (S_b), populasi yang terinfeksi penyebaran penyakit (I), dan populasi yang dinyatakan sembuh dari penyakit (R). Dalam model ini individu yang diberikan vaksin sampai dua kali tahap, individu yang telah melakukan vaksinasi sebanyak dua kali masih dapat tertular COVID-19 namun gejalanya tidak seberat individu yang belum melakukan vaksinasi sehingga individu yang telah divaksin dapat mengurangi kesakitan yang parah dan bahaya kematian. Individu yang sudah melakukan vaksinasi akan membentuk imun terhadap penyakit dengan memenuhi syarat untuk tetap menjaga kebersihan dan mematuhi protokol kesehatan yang telah ditetapkan. Berbagai model epidemik penyebaran COVID-19, khususnya di Indonesia juga dijelaskan dalam (Adi & Ndi, 2020, Ndi & Adi, 2020, Erina & Adi, 2021, Khoerunnisa & Adi, 2021).

FORMULASI MODEL MATEMATIKA

Untuk menyusun model matematika penyebaran COVID-19, populasi terbagi menjadi 4 (empat) sub populasi, yaitu *Susceptible* tanpa penyakit bawaan (S) yaitu kelas individu yang rentan terserang penyakit COVID-19 dan kemungkinan akan terkena penyakit tersebut, *Susceptible* dengan penyakit bawaan (S_b) yaitu kelas individu yang juga rentan terjangkit penyakit Covid-19 namun berpotensi terkena penyakit tersebut, *Infectious* (I) yaitu kelas individu yang terinfeksi oleh virus COVID-19 dan mampu menularkan virus ini kepada manusia lainnya, dan Sembuh/Recovered (R) yaitu kelas individu yang terinfeksi

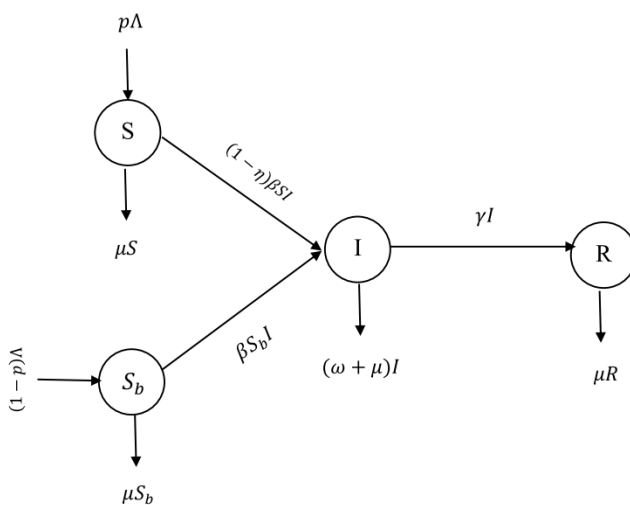
penyakit COVID-19 lalu dinyatakan sembuh dari penyakit. Diagram penyebaran COVID-19 ditunjukkan pada Gambar 1.

Populasi pada kelas rentan tanpa penyakit bawaan (S) bertambah dari adanya kelahiran maupun individu yang masuk ke S sebesar $p\Lambda$, dengan Λ adalah konstan dan berkurang sebab adanya kematian alami (μS) serta populasi pada kelas S yang diberi vaksin dan kemudian terinfeksi penyakit sebesar $(1 - \eta)\beta SI$.

$$\frac{dS}{dt} = p\Lambda - (1 - \eta)\beta SI - \mu S.$$

Populasi susceptible dengan penyakit bawaan (S_b) akan bertambah karena adanya kelahiran konstan maupun sebagian individu yang masuk ke kelas sebesar $(1 - p)\Lambda$. Populasi ini berkurang sebab adanya kematian alami (μ) serta interaksi anatar individu rentan dengan penyakit bawaan dengan individu terinfeksi penyakit yang menyebabkan individu akan terinfeksi dengan laju β . Diperoleh persamaan

$$\frac{dS_b}{dt} = (1 - p)\Lambda - \beta S_b I - \mu S_b.$$



Gambar 1. Diagram penyebaran COVID-19 dengan penyakit bawaan.

Selanjutnya, populasi individu terinfeksi (I) dapat menularkan penyakit Corona Virus Disease 2019 (COVID-19) terhadap individu yang lainnya. Bertambahnya populasi kelas infeksi disebabkan masuknya individu dari kelas rentan tanpa penyakit bawaan dan kelas rentan dengan penyakit bawaan yang berhasil terinfeksi berturut-turut sebesar $(1 - \eta)\beta SI$ dan $\beta S_b I$. Sedangkan berkurangnya populasi dikarenakan adanya kematian alami, kematian akibat terinfeksi dan individu yang terinfeksi kemudian sembuh dari penyakit dengan laju berturut-turut μ, ω , dan γ . Diperoleh persamaan berbentuk

$$\frac{dI}{dt} = (1 - \eta)\beta SI + \beta S_b I - \omega I - \gamma I - \mu I.$$

Terakhir, populasi individu sembuh dari penyakit COVID-19 (R) yang diasumsikan tidak akan terserang kembali. Populasi kelas ini bertambah sebab adanya individu yang terinfeksi kemudian dinyatakan sembuh dengan laju kesembuhan γ , serta berkurang karena adanya kematian alami, μ . Persamaan dinyatakan dalam bentuk

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I - \mu R.$$

Dengan demikian diperoleh model penyebaran COVID-19 dengan memperhatikan penyakit bawaan dan vaksin dinyatakan dalam sistem persamaan (1) berikut

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= p\Lambda - (1 - \eta)\beta SI - \mu S - \frac{dS_b}{dt} \\ &= (1 - p)\Lambda - \beta S_b I - \mu S - \frac{dI}{dt} \\ &= (1 - \eta)\beta SI + \beta S_b I - \omega I - \gamma I - \mu I - \frac{dR}{dt} \quad (1) \\ &= \gamma I - \mu R. \end{aligned}$$

Sistem (1) perlu dianalisis dengan memperhatikan kondisi awal $S(0) > 0, S_b(0) > 0, I(0) > 0$, dan $R(0) > 0$.

Lemma berikut memverifikasi bahwa semua solusi dengan kondisi awal nonnegatif tetap nonnegatif untuk semua $t > 0$.

Lemma 1. Himpunan $\Omega = \{(S, S_b, I, R) | S + S_b + I + R \leq \frac{\Lambda}{\mu}\}$ adalah invarian positif dan atraktor untuk persamaan (1).

Bukti. Dari sistem (1) diperoleh $\frac{dS}{dt} + \frac{dS_b}{dt} + \frac{dI}{dt} + \frac{dR}{dt} = \Lambda - \mu N - \omega I \leq \Lambda - \mu N$, dengan $N(t) = S(t) + S_b(t) + I(t) + R(t)$. Dengan demikian

$$\frac{dN}{dt} \leq \Lambda - \mu N.$$

Jadi diperoleh $0 \leq \sup \sup N(t) \leq \frac{\Lambda}{\mu}$, sehingga solusi dari persamaan (1) terbatas dan berada di dalam Ω untuk semua $t > 0$.

Pada bagian berikut dibahas eksistensi dan kestabilan titik ekuilibrium.

TITIK EKUILIBRIUM DAN KESTABILANNYA

Sistem (1) mempunyai titik ekuilibrium bebas penyakit $E_0 = \left\{ \frac{p\Lambda}{\mu}, \frac{(1-p)\Lambda}{\mu}, 0, 0 \right\}$ dan titik ekuilibrium penyakit

$$E_1 = \left\{ \frac{(\omega + \gamma + \mu)(\beta I^* + \mu) - \Lambda\beta(1-p)}{(\beta I^* + \mu)(1-\eta)\beta}, \frac{(1-p)\Lambda}{(\beta I^* + \mu)}, I^*, \frac{\gamma I^*}{\mu} \right\},$$

dengan

$$I^* = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_0a_2}}{2a_0},$$

$$a_0 = (1-\eta)\beta^2(\omega + \gamma + \mu),$$

$$a_1 = \beta\mu(\omega + \gamma + \mu) + (1-\eta)\beta\mu(\omega + \gamma + \mu) - (1-p)(1-\eta)\Lambda\beta^2 - (1-\eta)\Lambda\beta^2p,$$

$$a_2 = \mu^2(\omega + \gamma + \mu)(1 - R_0).$$

Titik ekuilibrium E_1 eksis jika $I^* > 0$, yaitu jika $R_0 > 1$ dengan R_0 adalah angka reproduksi dasar yang dinyatakan dengan $R_0 = \frac{\Lambda\beta((1-\eta)p + (1-p))}{\mu(\omega + \gamma + \mu)}$.

Berikut ini diberikan teorema yang menyatakan kondisi sedemikian sehingga titik ekuilibrium stabil asimtotik lokal.

Teorema 1. Titik ekuilibrium $E_0 = \left\{ \frac{p\Lambda}{\mu}, \frac{(1-p)\Lambda}{\mu}, 0, 0 \right\}$ stabil asimtotik lokal jika $R_0 < 1$ dan tidak stabil jika $R_0 > 1$.

Bukti. Nilai eigen matriks Jacobi dari Sistem (1) di titik ekuilibrium $E_0 = \left\{ \frac{p\Lambda}{\mu}, \frac{(1-p)\Lambda}{\mu}, 0, 0 \right\}$ adalah $\lambda_1 = -\mu, \lambda_2 = -\mu, \lambda_3 = -\mu$ dan $\lambda_4 = (\omega + \gamma + \mu)(R_0 - 1)$. Semua nilai eigen bernilai negatif jika $R_0 < 1$. Dengan demikian titik kesetimbangan E_0 stabil asimtotik lokal jika $R_0 < 1$.

Teorema 2. Titik ekuilibrium $E_1 = \left(\frac{(\omega + \gamma + \mu)(\beta I^* + \mu) - \Lambda \beta (1-p)}{(\beta I^* + \mu)(1-\eta)\beta}, \frac{(1-p)\Lambda}{(\beta I^* + \mu)}, I^*, \frac{\gamma I^*}{\mu} \right)$ stabil asimtotik lokal jika $R_0 > 1$.

Bukti. Persamaan karakteristik dari matriks Jacobian di titik ekuilibrium E_1 adalah

$$(\lambda + \mu)(\lambda^3 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3) = 0,$$

dengan

$$a_1 = (1 - \eta)\beta I^* + 2\mu + \beta I^*$$

$$a_2 = (1 - \eta)\beta^2 I^{*2} + \beta I^* \mu + (1 - \eta)\beta I^* \mu + \mu^2 - \frac{(1-p)R_0\mu(\omega + \gamma + \mu)\beta^2 I^* \eta}{(\beta I^* + \mu)(\beta(1-\eta)p + (1-p))} - (1 - \eta)\beta I^*(\omega + \gamma + \mu)$$

$$a_3 = -\frac{(1-p)R_0(\omega + \gamma + \mu)\beta^2 I^{*2} \mu^2 \eta}{(\beta I^* + \mu)(\beta(1-\eta)p + (1-p))} - (\omega + \gamma + \mu) \left((1 - \eta)(\beta^2 I^{*2} + \beta I^* \mu) \right)$$

Sehingga diperoleh nilai eigen $\lambda_1 = -\mu < 0$, dan ketiga nilai eigen lain merupakan akar dari $\lambda^3 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3 = 0$. Menurut kriteria Routh-Hurwitz, E_1 stabil asimtotik lokal jika dan hanya jika $a_1 > 0, a_3 > 0$, dan $a_1a_2 - a_3 > 0$. Kondisi ini terpenuhi jika $R_0 >$

1. Dengan demikian $E_1 = \left(\frac{(\omega + \gamma + \mu)(\beta I^* + \mu) - \Lambda \beta (1-p)}{(\beta I^* + \mu)(1-\eta)\beta}, \frac{(1-p)\Lambda}{(\beta I^* + \mu)}, I^*, \frac{\gamma I^*}{\mu} \right)$ stabil asimtotik lokal jika $R_0 > 1$.

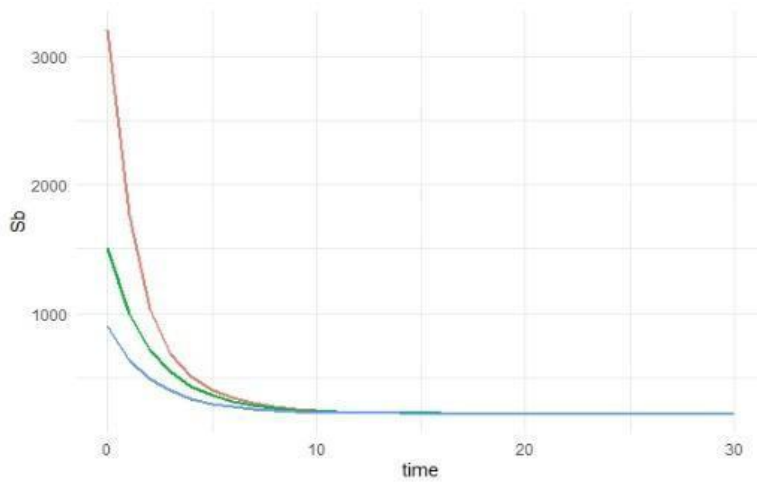
SIMULASI NUMERIK

Selanjutnya dilakukan interpretasi model ke dalam bentuk simulasi menggunakan software Rstudio. Simulasi diawali dengan memberikan nilai awal pada parameter-parameter dan mengubah-ubah nilai untuk parameter tertentu pada Sistem (1). Untuk model matematika pada penyebaran penyakit COVID-19 dengan mempertimbangkan penyakit bawaan dan pemberian vaksinasi dimasukkan nilai parameter-parameter pada Tabel 1.

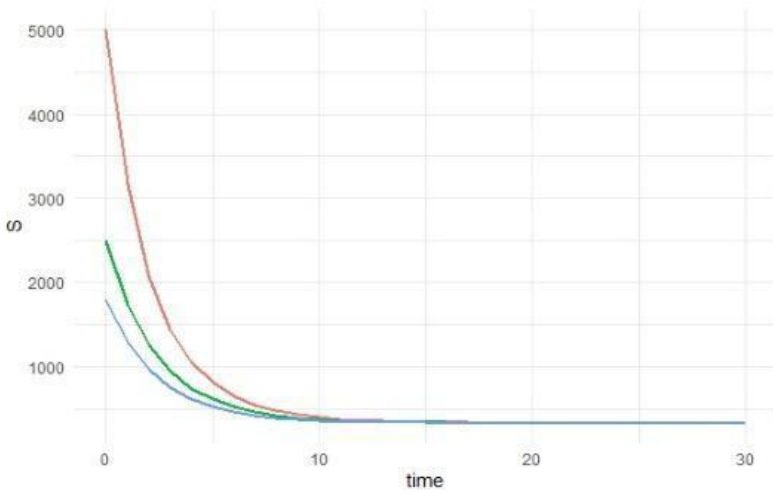
Tabel 1. Nilai-nilai Parameter

Simbol	Nilai Parameter	Estimasi
Λ	218	Estimasi
p	0.6	Asumsi
η	0.6	Asumsi
β	0.000000339	Asumsi
μ	0.0000394	Estimasi
γ	0.0211	Estimasi
ω	0.7887	Estimasi

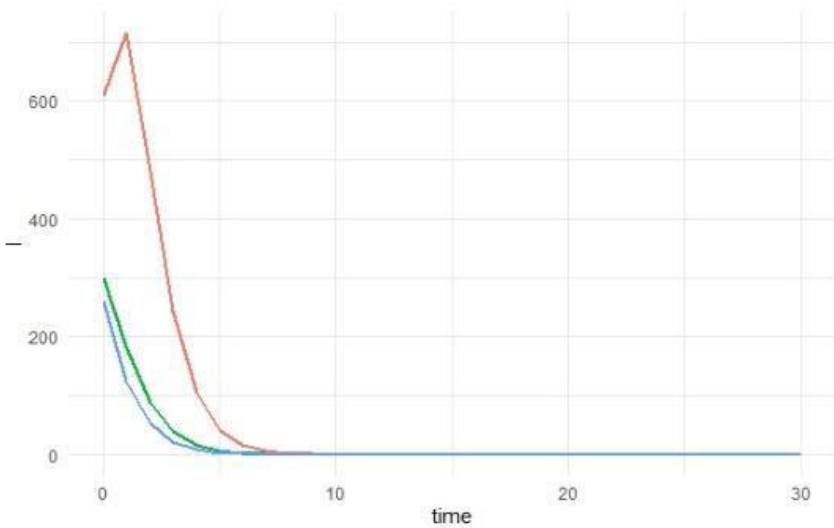
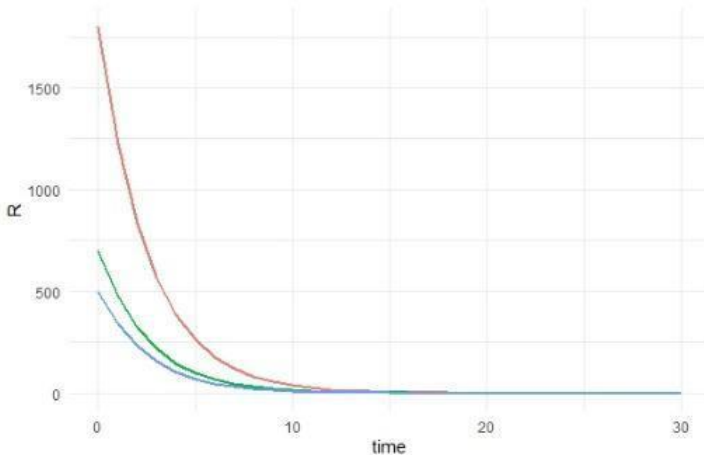
Berdasarkan nilai parameter diperoleh pada Tabel 1 kemudian mengubah parameter $\beta = 0.000339$ dan $\mu = 0.394$ sehingga diperoleh nilai bilangan reproduksi dasar R_0 nya sebesar $R_0 = 0.09 < 1$. Dan disajikan dalam Gambar 2(a) – 2(d) berikut :



(a). Grafik $S(t)$ terhadap t



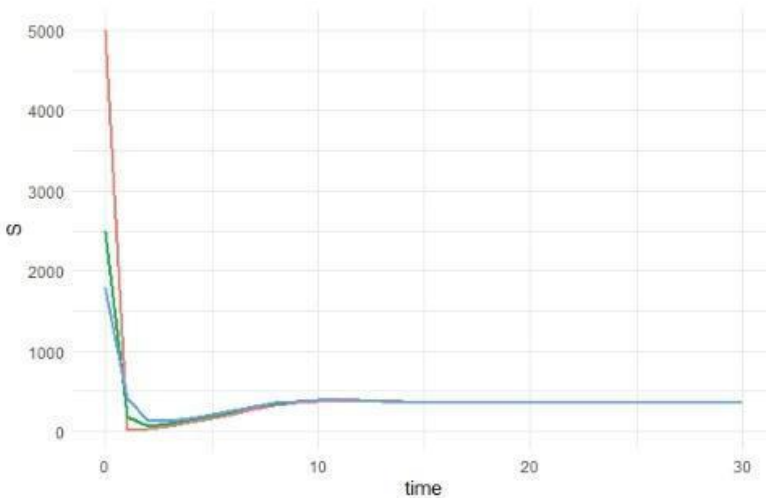
(b) Grafik $S_b(t)$ terhadap t

(c) Grafik $I(t)$ terhadap t (d) Grafik $R(t)$ terhadap t **Gambar 2.** Kestabilan penyebaran COVID-19 di titik E_0

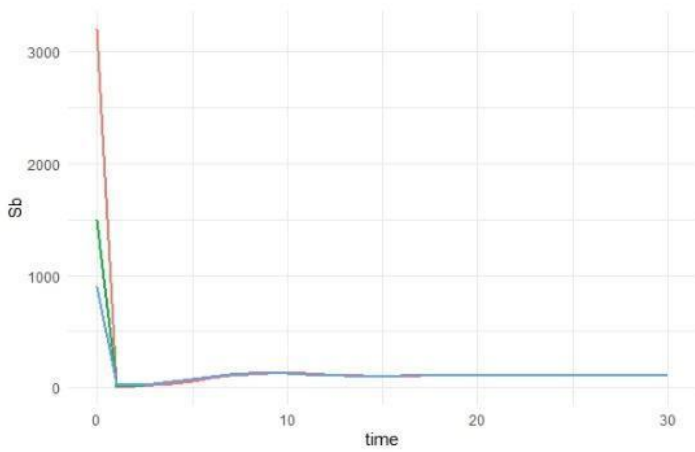
Dari Gambar 2 terlihat bahwa populasi dengan menggunakan nilai awal yang berbeda dan grafik menuju satu titik. Populasi individu yang rentan tanpa penyakit bawaan menurun sampai hari ke-30 dan stabil pada titik ini. Populasi individu yang rentan dengan penyakit bawaan mengalami penurunan sampai hari ke-30 dan stabil pada titik ini. Populasi individu yang terinfeksi menurun

sampai hari ke-30 dan stabil pada titik tersebut. Populasi individu yang telah sembuh dari penyakit menurun sampai hari ke-30 dan stabil pada titik tersebut. Sehingga disimpulkan bahwa sistem persamaan bersifat stabil yang artinya penyebaran virus COVID-19 akan menghilang dari populasi.

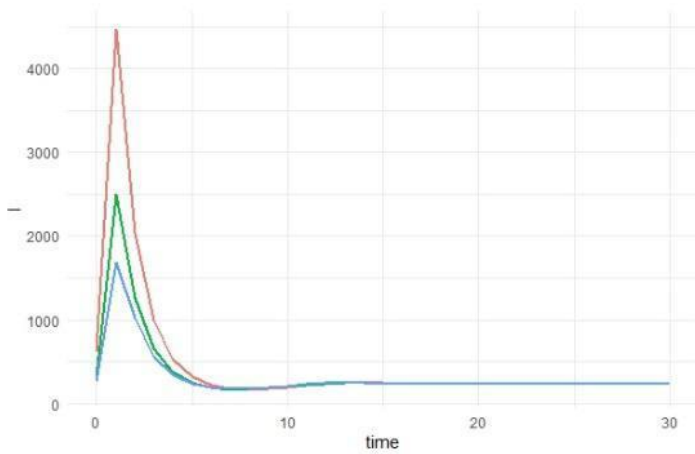
Selanjutnya akan dilakukan simulasi untuk $R_0 > 1$. Berdasarkan nilai parameter diperoleh pada tabel 1 kemudian mengubah parameter $\beta = 0.00339$ dan $\mu = 0.0394$ sehingga diperoleh nilai bilangan reproduksi dasar R_0 nya sebesar $R_0 = 14,13 > 1$. Dan disajikan dalam Gambar 3(a) – 3(d) berikut :



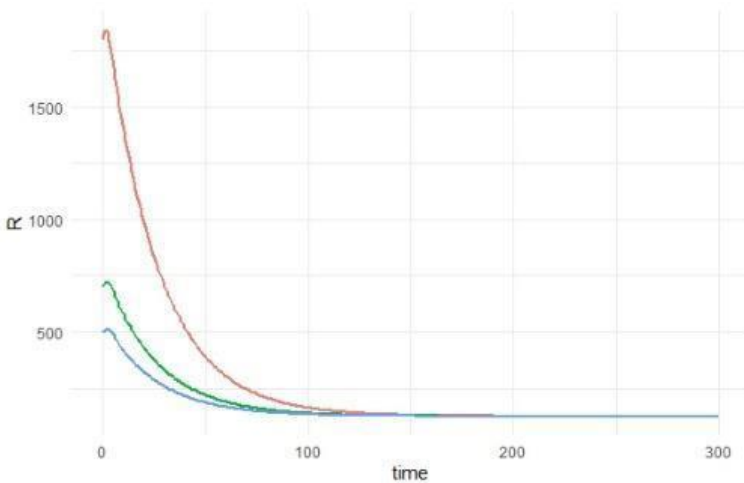
(a) Grafik $S(t)$ terhadap t



(b) Grafik $S_b(t)$ terhadap t



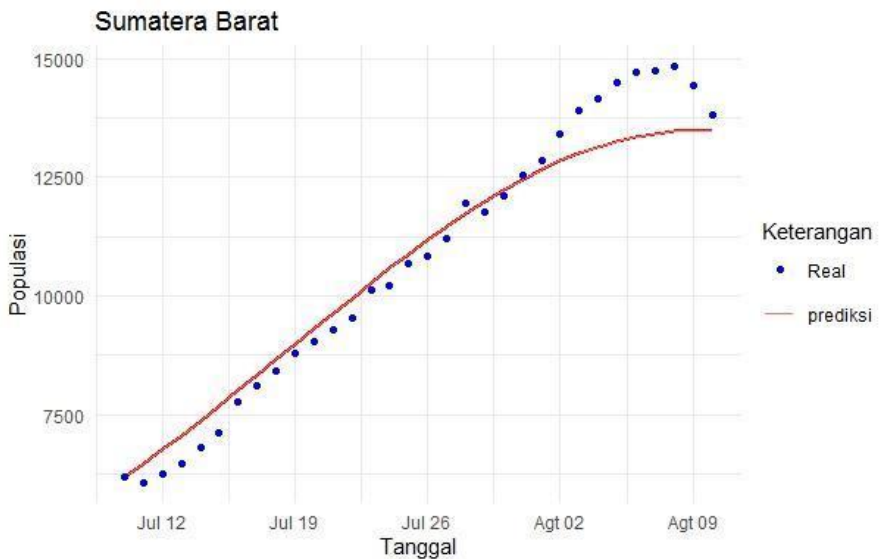
(c) Grafik $I(t)$ terhadap t

(d) Grafik $R(t)$ terhadap t **Gambar 3** Kestabilan penyebaran COVID-19 di titik E_1

Dari gambar 3 dilihat bahwa populasi dengan menggunakan nilai awal yang berbeda dan grafik menuju satu titik. Populasi individu yang rentan tanpa penyakit bawaan menurun sampai hari ke-30 dan stabil pada titik ini. Populasi individu yang rentan dengan penyakit bawaan menurun sampai hari ke-30 dan stabil pada titik tersebut. Populasi individu yang terinfeksi naik dan kemudian mengalami penurunan sampai hari ke-30 dan stabil pada titik tersebut. Populasi individu yang telah sembuh dari penyakit menurun sampai hari ke-300 dan stabil pada titik ini. Sehingga disimpulkan bahwa sistem persamaan bersifat stabil yang artinya penyebaran virus COVID-19 akan tetap ada dalam populasi.

APLIKASI PADA KASUS COVID-19 DI SUMATERA BARAT

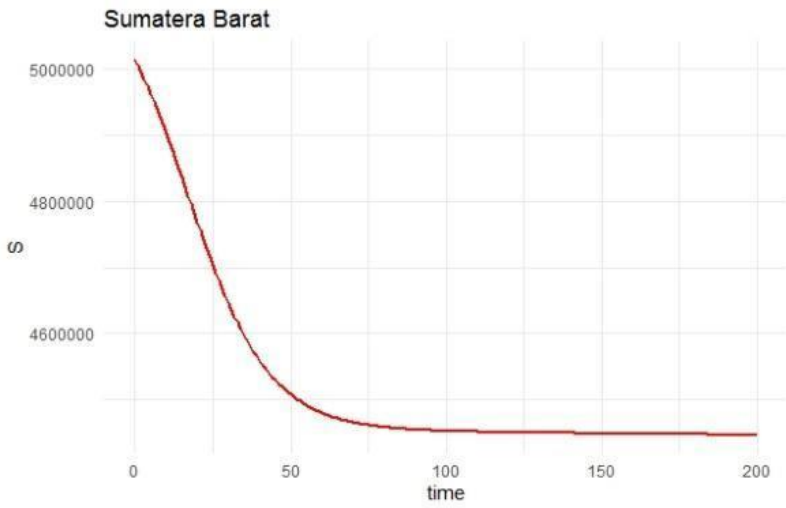
Selanjutnya akan dilakukan prediksi pada penyebaran COVID-19 di Provinsi Sumatera Barat, nilai parameter pada tabel 1 dengan syarat nilai awal pada model adalah $S(0) = 5014472$, $S_b(0) = 520000$, $I(0) = 6173$, $R(0) = 49152$ diperoleh estimasi bilangan reproduksi dasar diperkirakan sebesar $R_0 = 1,48$. Gambar 2 menunjukkan data real kasus COVID-19 di Sumatera Barat versus prediksi dengan model Sistem (1) :



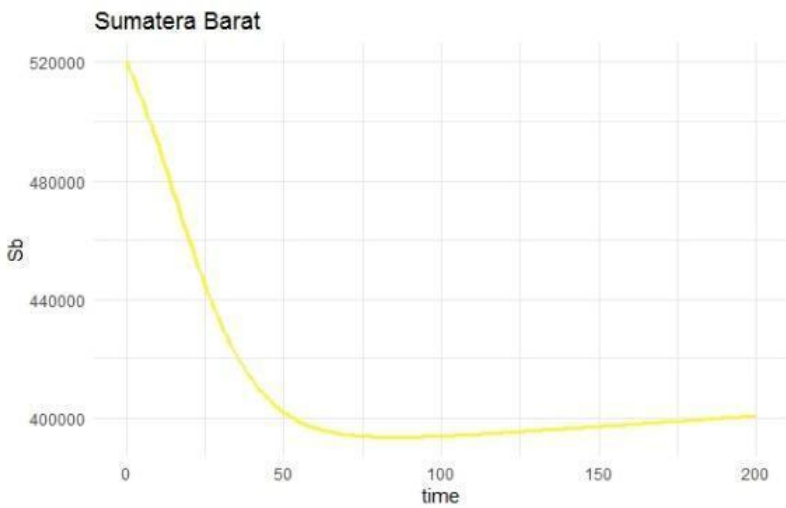
Gambar 4. Grafik prediksi data harian COVID-19 di Sumatera Barat dengan menggunakan model matematika SS_bIR .

Data harian COVID-19 di Provinsi Sumatera yang digunakan dari tanggal 10 Juni sampai dengan 10 Agustus 2021. Dari hasil data yang diprediksi dengan data realnya diperoleh nilai *MAPE* (*Mean Absolute Percent Error*) sebesar 4,5% dibawah 10% yang artinya model yang diramalkan sangat baik. Kasus harian COVID-19 di Sumatera Barat dari 10 Juli sampai 10 Agustus 2021 mengalami peningkatan dan setelah tanggal 10 Agustus mengalami penurunan. Hal yang sama juga berlaku untuk hasil perhitungan dari pemodelan SS_bIR .

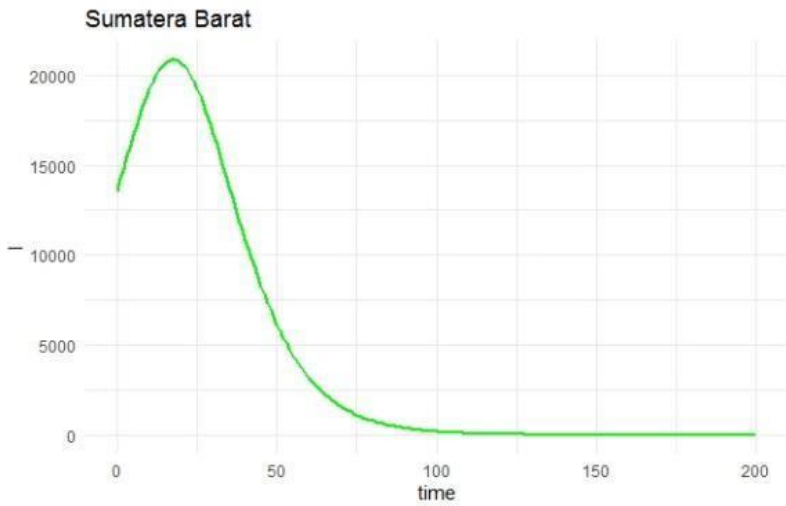
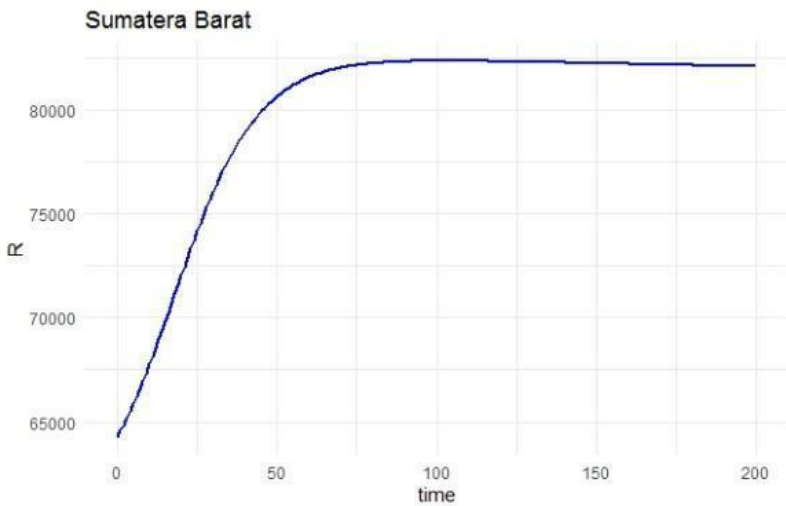
Selanjutnya dengan melihat sifat kestabilan dari setiap kelas populasi terhadap dinamika penyebaran COVID-19. Berdasarkan gambar dapat dilihat bahwa populasi menuju titik kesetimbangan endemik dan stabil disekitar titik endemik.



(a) populasi S terhadap t



(b) populasi S_b terhadap t

(c) populasi I terhadap t (d) populasi R terhadap t

Gambar 5. Simulasi Dinamika penyebaran COVID-19 di Sumatera Barat.

Berdasarkan Gambar 5 bahwa populasi mendekati titik kesetimbangan endemik atau stabil disekitar titik endemik. Populasi individu yang rentan tanpa penyakit bawaan terhadap virus COVID-19 mengalami penurunan dan stabil pada kondisi $S =$

366, populasi individu yang rentan dengan penyakit bawaan mengalami penurunan dan stabil pada kondisi $S_b = 104$, populasi individu yang terinfeksi penyakit COVID-19 mengalami kenaikan dan mengalami penurunan jumlah populasi sampai stabil pada kondisi $I = 235$, populasi individu yang dinyatakan sembuh dari penyakit COVID-19 mengalami kenaikan jumlah populasi sampai stabil pada saat kondisi $R = 126$. Berikut merupakan prediksi kasus harian COVID-19. Dari hasil simulasi tersebut, diprediksi puncak epidemi COVID-19 yang dikonfirmasi terinfeksi akan mencapai sekitar 20.878 pada hari ke 50.

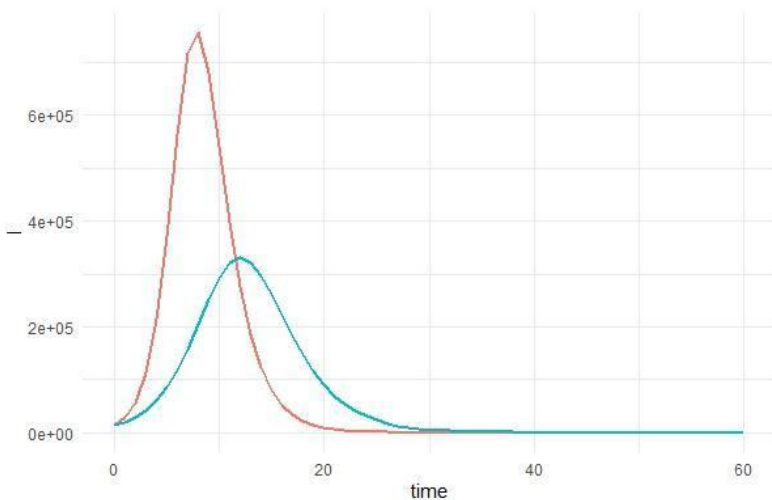
Selanjutnya akan dilakukan simulasi numerik untuk melihat efektivitas pada penggunaan vaksin COVID-19 dengan mengubah nilai parameter proporsi vaksin (η) yang disajikan dalam Table 2 berikut:

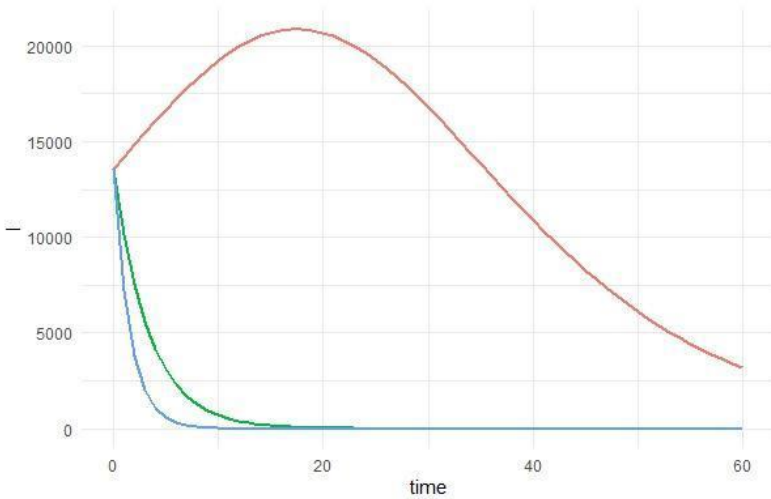
Tabel 2. Efektivitas penggunaan vaksin

η	R_0
0.2	2.0381856522234
0.4	1.7602512451021
0.6	1.4823168379807
0.8	1.2043824308593
1	0.9264480237379

Gambar 6 menunjukkan simulasi efektivitas penggunaan vaksin COVID-19. Berdasarkan Gambar 6 ketika nilai parameter untuk proporsi vaksin $\eta = 0.2$ diperoleh nilai bilangan reproduksi dasar $R_0 = 2.0381856522234 > 1$ yang artinya keadaan tidak bebas penyakit, dan individu terinfeksi mengalami kenaikan dan kemudian mengalami penurunan sampai hari ke-60 mendekati ke titik 0 dan stabil pada titik tersebut. Ketika nilai parameter untuk proporsi vaksin saat $\eta = 0.4$ diperoleh nilai bilangan reproduksi dasar $R_0 = 1.7602512451021 > 1$ yang artinya keadaan tidak

bebas penyakit, dan individu terinfeksi mengalami kenaikan dan kemudian mengalami penurunan sampai hari ke-60 mendekati ke titik 0 dan stabil pada titik tersebut. Ketika nilai parameter untuk proporsi vaksin saat $\eta = 0.6$ diperoleh nilai bilangan reproduksi dasar $R_0 = 1.4823168379807 > 1$ yang artinya keadaan tidak bebas penyakit, dan individu terinfeksi mengalami penurunan sampai hari ke-60 mendekati ke titik 0 dan stabil pada titik tersebut. Ketika nilai parameter untuk proporsi vaksin saat $\eta = 0.8$ diperoleh nilai bilangan reproduksi dasar $R_0 = 1.2043824308593 > 1$ yang artinya keadaan tidak bebas penyakit, dan individu terinfeksi mengalami penurunan sampai hari ke-60 mendekati ke titik 0 dan stabil pada titik tersebut. Ketika nilai parameter untuk proporsi vaksin saat $\eta = 1$ sehingga diperoleh nilai bilangan reproduksi dasar $R_0 = 0.9264480237379 < 1$ yang artinya keadaan bebas penyakit, dan individu terinfeksi mengalami penurunan sampai hari ke-60 mendekati ke titik 0 dan stabil pada titik tersebut.





Gambar 6. Simulasi efektivitas vaksinasi.

SIMPULAN

Dalam tulisan ini dibentuk model matematika SS_bIR pada COVID-19. Dari model matematika SS_bIR terdapat dua titik ekuilibrium yang pertama titik ekuilibrium bebas penyakit yang memiliki kestabilan titik ekuilibrium stabil asimtotik lokal saat $R_0 < 1$ dan yang kedua titik ekuilibrium endemik penyakit yang eksistensinya tergantung pada R_0 yaitu ada jika $R_0 > 1$. Dari hasil simulasi yang diperoleh pada efektivitas penggunaan vaksin dapat diartikan bahwa proporsi penggunaan vaksin diperbesar yang artinya penggunaan vaksin cukup efektif maka penyakit akan semakin cepat menghilang dari populasi.

DAFTAR PUSTAKA

<https://covid19.who.int/>

Adi,Y.A, Ndi, M.Z. (2020), Modeling and Prediction of COVID-19 with a Large Scale Social Distancing, *Fourier*, Vol 9. No. 1, pp: 1 – 9.

Ndi, M.Z., Adi Y.A. (2020), Modelling the transmission dynamics of COVID-19 under limited resources, *Commun. Math. Biol. Neurosci.*, Article ID 62.

- Ferastuti, E.T, Adi, Y.A. (2021), Model matematika SSmIR pada penyebaran covid-19 dengan penerapan pemberlakuan pembatasan kegiatan masyarakat (ppkm) di jawa tengah, *Unnes Journal of Mathematics*, Vol. 10 No.2, pp: 66 – 74.
- Khoerunnisa, Adi, Y.A. (2021), Masalah kontrol optimal pada penyebaran covid-19 di jawa tengah dengan vaksinasi, *Jurnal Matematika UNAND*, Vol. 10, No. 4, pp: 538 – 552.
- Bao, L., Deng, W., Huang, B., Gao, H., Liu, J., Ren, L., dkk. (2020). The pathogenicity of SARS-CoV-2 in hACE2 transgenic mice. *Nature*. doi:10.1038/s41586-020-2312-y
- Jin, Y., Yang, H., Ji, W., Wu, W., Chen, S., Zhang, W., & Duan, G. (2020). Virology, epidemiology, pathogenesis, and control of covid-19. *Viruses*, 12(4), 1–17. <https://doi.org/10.3390/v12040372>
- Roosa, K., Lee, Y., Luo, R., Kirpich, A., Rothenberg, R., Hyman, J. M., Yan, P., & Chowell, G. (2020). Real-time forecasts of the COVID-19 epidemic in China from February 5th to February 24th, 2020. *Infectious Disease Modelling*, 5, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2020.02.002>
- Shereen, M. A., Khan, S., Kazmi, A., Bashir, N., & Siddique, R. (2020). COVID-19 infection: Origin, transmission, and characteristics of human coronaviruses. *Journal of Advanced Research*, 24, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.03.005>
- https://corona.sumbarprov.go.id/details/peta_covid19
- Zareh Gavgani, V. (2020). Infodemic in the Global Coronavirus Crisis. *Depiction of Health*, 11(1), 1–5. <https://doi.org/10.34172/doh.2020.01>