

## KENDALI OPTIMAL PADA MODEL PENYAKIT DEMAM BERDARAH DENGUE (DBD) DENGAN PENGobatan DI BANTARAN SUNGAI MARTAPURA

Pardi Affandi<sup>1,\*</sup>, Mahfuzh Shiddiq<sup>2</sup>, Oscar A.B<sup>3</sup> Abdul Rahim<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Matematika Fakultas MIPA Universitas Lambung Mangkurat, Banjarmasin, Indonesia

<sup>4</sup>Program Studi Ilmu Komputer Fakultas MIPA STMIK Samarinda, Indonesia

\*Penulis korespondensi: p\_affandi@ulm.ac.id

**Abstrak.** Demam Berdarah Dengue (DBD) adalah penyakit yang disebabkan oleh jenis arbovirus yang masuk ke tubuh manusia melalui perantara nyamuk *Aedes aegypti* atau *Aedes albopictus*. Penyakit Demam Berdarah Dengue (DBD) ditandai dengan gejala dengue demam; sakit kepala; kulit kemerahan yang tampak seperti campak; serta nyeri otot dan persendian. Pada sejumlah pasien, demam dengue dapat berubah menjadi satu dari dua bentuk yang mengancam jiwa yang menyebabkan penurunan kekebalan tubuh. Berbagai cara telah dilakukan untuk mencegah penyebab penyakit DBD ini, namun hasilnya belum optimal. Permasalahan penyebaran virus DBD ini juga dapat dimodelkan secara matematika dan melalui kestabilan titik kesetimbangan dapat ditentukan dinamika atau perilaku model. DBD dapat ditekan penyebarannya dengan pemberian suatu kontrol berupa pengobatan. Jenis pengobatan diberikan pada individu yang terinfeksi. Pengobatan ini dapat dikontrol secara optimal dengan menerapkan prinsip maksimum Pontryagin. Prinsip maksimum Pontryagin adalah penyelesaian kontrol optimal yang sesuai dengan tujuan yaitu memaksimalkan performance index. Tujuan penelitian ini adalah membentuk model dimulai dari penentuan asumsi, parameter dan pembentukan model SIV-T, menentukan analisis kestabilan selanjutnya melibatkan kendali optimal dengan prinsip minimum Pontryagin untuk melakukan strategi kontrol optimal untuk model penyakit Demam Berdarah Dengue (DBD) juga dilakukan simulasi menggunakan software. Hasil dari penelitian ini adalah menjelaskan bagaimana terbentuknya model penyebaran virus DBD di dalam tubuh manusia, diperoleh 2 titik ekuilibrium yaitu titik ekuilibrium bebas penyakit stabil asimtotik lokal dan titik endemik stabil asimtotik lokal. Strategi kontrol optimal pada model penyebaran penyebaran virus DBD bertujuan memaksimalkan jumlah sel yang sehat dengan pemberian suatu kontrol berupa pengobatan.

**Kata kunci:** Model Penyakit DBD, Kontrol optimal, Prinsip maksimum Pontryagin.

### 1. PENDAHULUAN

Instrument yang mendasari pengaruh penyebaran penyakit dapat di deteksi melalui pemodelan matematika, dengan penerapan strategi kontrol beserta aplikasinya. Banyak referensi yang mengaplikasikan teori kontrol ke dalam permasalahan penyakit diantaranya penyakit malaria (Affandi P., Faisal. 2017), diare (Affandi P., 2020), penyakit disentri (Affandi P., N. Salam. 2021), juga oleh Kermack, W. O. and Mc Kendrick, A. G (1927), Bellomo, N. dan Preziosi, L. (1995). Namun teori kontrol juga banyak diaplikasikan ke dalam masalah industri dan *inventori Inventory Control Stochastic* (Affandi, P., 2015), *Inventory Control with Stochastic demand* (Affandi, P., 2015), *Inventory Production System* (Affandi, P., 2015), perluasan model inventori (Affandi, P., Salmah 2014) dan Lotfi Tadz tentang *inventory system with ameliorating and deteriorating items*. Banyak model penyakit yang dijadikan objek dalam penelitian tersebut diantaranya model penyakit malaria, scabies, diare, disentri dan Demam Berdarah Dengue (DBD).

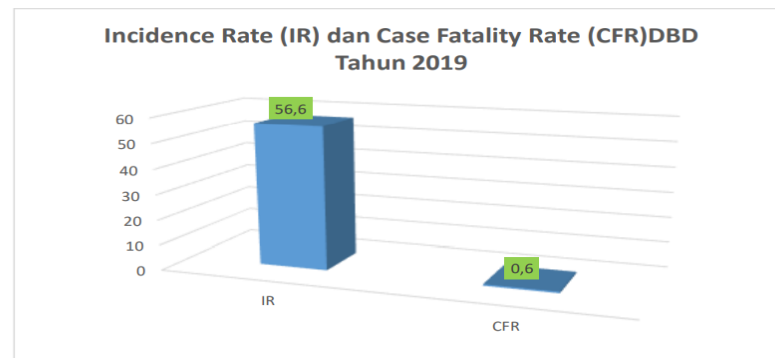
DBD adalah infeksi yang disebabkan oleh virus dengue. Ada beberapa jenis nyamuk menularkan atau menyebarkan virus dengue yang ditandai beberapa gejala dengue adalah demam; sakit kepala; kulit kemerahan yang tampak seperti campak; serta nyeri otot dan persendian. Pada sejumlah pasien, demam dengue dapat berubah menjadi satu dari dua bentuk yang mengancam jiwa (Katrina Pareallo ., W. Sanusi, 2018).

Berdasarkan Laporan Dinas Kesehatan Kota Banjarmasin data Profil Kesehatan Propinsi Kalimantan tahun 2019 penyakit ini berkaitan dengan kondisi lingkungan dan perilaku masyarakat, penyakit DBD bersifat endemis baik di daerah perkotaan juga di daerah pedesaan.

Berdasarkan gambar 1 menunjukkan bahwa atau angka kesakitan di Propinsi Kalimantan Selatan pada tahun 2019 yaitu 56.6 per 100.000 dengan total kasus sebanyak 2.401 kasus dengan total kematian karena DBD 14 kasus ( CFR/angka kematian 0,6 %).



Adapun Incidence Rate (IR) dan Case Fatality Rate (CFR) DBD di Kalimantan Selatan sebagai berikut.



Sumber: Profil Kabupaten/Kota di Provinsi Kalimantan Selatan tahun 2019

Gambar 1. Incidence Rate (IR) dan Case Fatality Rate (CFR) DBD di Provinsi Kalimantan Selatan Tahun 2019

Banyak cara yang dilakukan oleh pemerintah melalui Dinas Kesehatan Kalimantan Selatan secara khusus pemerintah Kabupaten Banjar dan Kota Banjarmasin untuk dapat menanggulangi masalah DBD ini, namun masih dibutuhkan kerjasama agar dapat mengatasi masalah ini secara baik. Dalam penelitian ini melibatkan model dan teori kontrol optimal. Pencegahan penyebaran penyakit melalui kontrol optimal telah banyak diteliti, seperti penelitian kontrol optimal pada model penyebaran penyakit demam berdarah dengan kontrol insektisida (Rodrigues, H.S., 2010), dan penyembuhan secara kimiawi (Puntani Pongsumpun., 2019).

Model yang digunakan adalah sistem persamaan diferensial yang mewakili epidemi SIV-T yang menggambarkan penyakit Demam Berdarah Dengue. Strategi kontrol yang optimal diusulkan untuk mengurangi jumlah manusia yang terinfeksi dengan menggunakan kontrol berupa pengobatan. Jenis pengobatan yang digunakan adalah sesuai (Sheng-Qun Deng., Xian Yang., 2020, diberikan pada individu yang terinfeksi. Pengobatan ini dapat dikontrol secara optimal dengan menerapkan prinsip maksimum Pontryagin. Prinsip maksimum Pontryagin digunakan untuk menemukan kondisi yang diperlukan untuk keberadaan kontrol yang optimal. Metode aproksimasi numerik digunakan untuk menyelesaikan sistem kontrol yang optimal.

## 2. METODE

Metode penelitian direncanakan diawali dengan melakukan kajian literature berupa hasil-hasil penelitian sebelumnya yang mengungkap tentang pembentukan model penyakit demam berdarah Dengue (DBD) sebagai dasar pembentukan model pada DBD, khususnya faktor dan asumsi model-model yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya.

Hasil kajian tersebut menjadi dasar untuk menyusun asumsi awal serta penentuan model awal yang dapat diimplementasikan serta mengumpulkan data sekunder lewat survey data melalui angket data yang akan disebarkan kepada masyarakat sekitar bantaran sungai Martapura sehingga akan diperoleh data yang sesuai, realible dan valid. Sebelum data utama yang sangat relevan dengan tujuan penelitian dikumpulkan, terlebih dahulu disusun mekanisme pengumpulan data yang baik agar data yang diperoleh nantinya bersifat valid, akurat dan reliable dalam pembentukan model.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Model Transmisi Virus Dengue

#### 3.1.1 Asumsi Model

Adapun asumsi yang digunakan dalam model ini adalah sebagai berikut:

1. Tidak ada mikroorganisme yang lain menyerang tubuh manusia selain virus dengue.
2. Infeksi virus dengue terjadi secara internal yaitu didalam tubuh manusia
3. Pengobatan yang diberikan dapat menghambat replika virus dengue.



4. Populasi tertutup dan konstan.
5. Sel T bekerja membunuh virus dengue
6. Kepadatan sel rentan bertambah dengan laju konstan sebesar  $a$ .

Adapun variabel-variabel dan parameter-parameter yang digunakan dalam model proses transmisi virus dengue di dalam tubuh manusia disajikan dalam tabel di bawah ini.

Tabel 1. Daftar variabel-variabel model

| No. | Variabel | Keterangan                                                                            |
|-----|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | $S(t)$   | kelas populasi sel yang rentan ( <i>susceptible</i> )                                 |
| 2.  | $I(t)$   | kelas populasi sel yang terinfeksi ( <i>infectious</i> ) virus                        |
| 3.  | $T(t)$   | kelas populasi sel yang terinfeksi virus lalu mendapatkan treatment pengobatan herbal |
| 4.  | $V(t)$   | kelas populasi virus dengue ( <i>viruses</i> )                                        |

Tabel 2. Daftar parameter-parameter

| No. | Parameter | Keterangan                                                       |
|-----|-----------|------------------------------------------------------------------|
| 1.  | $a$       | Laju kelahiran murni sel yang rentan                             |
| 2.  | $b$       | Proporsi dari banyaknya virus dengue yang berpindah              |
| 3.  | $d$       | Laju kematian murni sel rentan                                   |
| 4.  | $w$       | Laju kematian murni sel yang terinfeksi                          |
| 5.  | $n$       | Banyaknya duplikasi virus dengue baru                            |
| 6.  | $m$       | Proporsi banyaknya sel terinfeksi yang menghasilkan virus        |
| 7.  | $c_1$     | Laju kematian murni virus dengue                                 |
| 8.  | $c_2$     | Laju kematian virus dengue yang disebabkan sel T                 |
| 9.  | $p$       | Laju kematian virus dengue yang disebabkan pengobatan            |
| 10. | $q$       | Laju sel terinfeksi yang mendapatkan <i>treatment</i> pengobatan |

### 3.1.2 Pembentukan Model Matematika

Struktur Pembentukan model matematika adalah menggunakan Model SIT-V, yang merupakan proses transmisi virus dengue di dalam tubuh manusia. Dalam pembentukan model dibagi menjadi 4 (empat) kompartemen kelas populasi yakni S kelas populasi sel yang rentan (*susceptible*), I kelas populasi sel yang terinfeksi (*infectious*) virus, T kelas populasi sel yang terinfeksi virus lalu mendapatkan treatment pengobatan dan V kelas populasi virus dengue (*viruses*).

Pertambahan banyaknya jumlah sel yang rentan dipengaruhi adanya penambahan dari laju kelahiran murni sel rentan ( $a$ ). Sementara itu banyaknya pengurangan jumlah sel yang rentan dipengaruhi adanya kematian alami dari individu *susceptible* per satuan waktu ( $dS$ ) dan penyebaran banyaknya individu *susceptible* yang terinfeksi virus dengue per satuan waktu ( $bSV$ ). Oleh karena itu diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\frac{dS}{dt} = aS - bSI - bSV + dS \quad (1)$$

Individu *susceptible* yang mulai terinfeksi virus DBD per satuan waktu ( $bSI$ ) mempengaruhi pertambahan populasi sel terinfeksi. Banyaknya individu yang mati alami ( $w$ ), pengobatan individu yang terinfeksi ( $q$ ), pemulihan individu yang terinfeksi tanpa pengobatan dan kematian individu akibat infeksi ( $w_1$ ) mempengaruhi pengurangan populasi sel terinfeksi. Sehingga diperoleh persamaan diferensial berikut.

$$\frac{dI}{dt} = bSI - wI - mnI - qIT \quad (2)$$

Individu yang terinfeksi virus DBD ( $I$ ) akan mempengaruhi pertambahan sel yang terinfeksi virus lalu mendapatkan treatment pengobatan. Banyaknya pemulihan individu dengan pengobatan ( $\alpha$ ) dan individu yang mati alami ( $\mu$ ) mempengaruhi pengurangan populasi dari individu yang harus dirawat. Didapat persamaan diferensial berikut.

$$\frac{dT}{dt} = qIT - \mu T - pTV \quad (3)$$



Banyaknya jumlah sel populasi virus dengue akan dipengaruhi oleh persamaan  $mnI$  sehingga diferensial berikut.

$$\frac{dR}{dt} = mnI + pTV - (c1 + c2)V \quad (4)$$

### 3. 2 Titik Ekuilibrium Model Matematika Penyebaran Virus DBD

Persamaan (1), (2), (3), (4) dapat ditulis dalam bentuk persamaan berikut,

$$f_1(S, I, V, T) = aS - bSI - bSV + dS$$

$$f_2(S, I, V, T) = bSI - wI - mnI - qIT$$

$$f_3(S, I, V, T) = qIT - \mu T - pTV$$

$$f_4(S, I, V, T) = mnI + pTV - (c1 + c2)V$$

Kemudian akan diperoleh titik ekuilibrium jika memenuhi,

$$f_1(S, I, V, T) = aS - bSI - bSV + dS = 0 \quad (5)$$

$$f_2(S, I, V, T) = bSI - wI - mnI - qIT = 0 \quad (6)$$

$$f_3(S, I, V, T) = qIT - \mu T - pTV = 0 \quad (7)$$

$$f_4(S, I, V, T) = mnI + pTV - (c1 + c2)V = 0 \quad (8)$$

Untuk menentukan titik ekuilibrium, dari persamaan (6) diperoleh:

$$bSI - wI - mnI - qIT = 0$$

$$\Leftrightarrow I(bS - mn - qT - w) = 0 \quad I \geq 0$$

$$\Leftrightarrow bS - mn - qT - w = 0$$

$$\Leftrightarrow S = \frac{(mn+qT+w)}{b} \quad (9)$$

Dari persamaan (7) diperoleh:

$$qIT - \mu T - pTV = 0$$

$$\Leftrightarrow \mu - (qI + pV)T = 0$$

$$\Leftrightarrow T = \frac{\mu}{(qI+pV)} \quad (10)$$

Dari persamaan (8) karena  $I = 0$  diperoleh:

$$mnI + pTV - (c1 + c2)V = 0 \Leftrightarrow V = 0 \quad (11)$$

Sehingga dari persamaan (9), (10) dan (11) diperoleh:

$$Q_0 = (S_0^*, I_0^*, V_0^*, T_0^*) = \left( \frac{(mn+qT+w)}{b}, 0, 0, \frac{\mu}{(qI+pV)} \right). \quad (12)$$

Selanjutnya, jika  $I > 0$  maka dari persamaan (6) diperoleh :

$$\Leftrightarrow bSI - wI - mnI - qIT = 0$$

$$\Leftrightarrow S = \frac{(mn+qT+w)I}{b} \quad (13)$$

Dari persamaan (4.7) diperoleh:

$$qIT - \mu T - pTV = 0$$

$$\Leftrightarrow \mu - (qI + pV)T = 0$$

$$\Leftrightarrow T = \frac{\mu}{(qI+pV)} \quad (14)$$

Dari persamaan (8) diperoleh:

$$mnI + pTV - (c1 + c2)V = 0$$

$$\Leftrightarrow V = \frac{-mnI}{(pT - (c1 + c2))}$$



$$\omega S + \gamma I - (\mu + \varepsilon)R = 0$$

$$\Leftrightarrow R = \frac{\omega S + \gamma I}{(\mu + \varepsilon)} \quad (15)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (4.13), (4.14) dan (4.15) ke persamaan (4.5) maka diperoleh: Virus akan hilang dan tidak akan terjadi endemik pada saat  $R_0 < 1$ . Kemudian dengan mensubstitusi nilai  $S$  pada titik ekuilibrium bebas penyakit ke persamaan (13), diperoleh:

$$R_0 = \frac{b \frac{(mn + qT + w)I}{b} - mn - qT}{w}$$

Sehingga bilangan reproduksi dasar untuk model penyebaran virus dengue yaitu:

$$R_0 = \frac{(mn + qT + w)I - mn - qT}{w} \quad (16)$$

### 3.3 Kontrol Optimal Model Penyakit DBD

Penyakit DBD bersifat stabil asimtotik lokal pada kedua titik ekuilibrium yang diperoleh. Selanjutnya karena penyebaran model stabil maka model tersebut akan diberi kontrol. Kontrol yang diberikan berupa pengobatan dimana obat tersebut diberikan kepada individu yang rentan terinfeksi. Kontrol optimal pada model bertujuan untuk memaksimalkan jumlah sel yang sehat dengan pemberian kontrol berupa obat yang dapat menghambat sel terinfeksi di dalam tubuh manusia. Kerja obat ini dapat dikontrol secara optimal dengan menerapkan prinsip maksimum Pontryagin. Prinsip maksimum Pontryagin merupakan suatu kondisi sedemikian sehingga dapat diperoleh penyelesaian kontrol optimal yang sesuai dengan tujuan yaitu memaksimalkan performance index.

Persamaan state yaitu :  $\dot{x} = f(x(t), u(t), t)$

Karena  $x = \begin{bmatrix} S \\ I \\ T \\ V \end{bmatrix}$  sehingga persamaan state menjadi  $\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{S} \\ \dot{I} \\ \dot{T} \\ \dot{V} \end{bmatrix}$  atau

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} aS - bSI - bSV + dS \\ bSI - wI - mnI - qIT \\ qIT - \mu T - pTV \\ mnI + pTV - (c1 + c2)V \end{bmatrix}$$

Persamaan performance index yang berdasarkan persamaan (2.16) adalah sebagai berikut:

$$J(u) = \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), u(t), t) dt$$

dengan  $t_0$  adalah waktu awal,  $t_f$  adalah waktu akhir,  $x(t)$  adalah variabel state (keadaan) dan  $u(t)$  adalah variabel kontrol. Persamaan performance index dinyatakan sebagai sistem dari keadaan awal ke keadaan akhir yaitu:

$$J(T, u) = \int_{t_0}^{t_f} (T - A(u(t))^2) dt$$

Kemudian, berdasarkan prinsip maksimum Pontryagin langkah pertama yang dilakukan adalah menentukan fungsi Hamiltonian yaitu sebagai berikut:

$$= T - \frac{1}{2} \gamma (u(t))^2 + \lambda_1$$

$$(aS - bSI - bSV((1 - u(t))) + dS) + \lambda_2(bSI - wI - mnI - qIT) + \lambda_3(qIT - \mu T - pTV((1 - u(t))) + \lambda_4(mnI + pTV - (c1 + c2)V))$$

Langkah kedua diasumsikan bahwa pada waktu optimal, variabel kontrol dan variabel state masing-masing adalah  $u^*(t)$  dan  $x^*(t)$  harus memenuhi:

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0$$

$$-\gamma u(t) + \lambda_1(bSV) + \lambda_3(pTV) = 0$$



$$u(t) = \frac{\lambda_1 (bSV) + \lambda_3 (pTV)}{\gamma}$$

$u(t)$  optimal dinyatakan sebagai  $u^*(t)$  sehingga

$$u^*(t) = \frac{V(\lambda_1 bS + \lambda_3 pT)}{\gamma}$$

Karena batasan  $u(t)$  nila  $0 \leq u(t) \leq 1$  maka dapat dikatakan batasan  $u^*(t)$  adalah  $0 \leq u^*(t) \leq 1$  sehingga diperoleh kemungkinan sebagai berikut:

$$u^*(t) = \begin{cases} \frac{V(\lambda_1 bS + \lambda_3 pT)}{\gamma}, & \text{jika } 0 < \frac{V(\lambda_1 bS + \lambda_3 pT)}{\gamma} < 1 \\ 0, & \text{jika } \frac{V(\lambda_1 bS + \lambda_3 pT)}{\gamma} \leq 0 \\ 1, & \text{jika } \frac{V(\lambda_1 bS + \lambda_3 pT)}{\gamma} \geq 1 \end{cases}$$

Berdasarkan kasus ini  $u^*(t)$  pada persamaan (29) merupakan  $u^*(t)$  optimal menyatakan maksimal dari kerja obat dengan pemberian obat yang minimal. Kemudian, langkah keempat adalah menyelesaikan persamaan state karena pada bentuk pengontrol  $u^*(t)$  mengandung variabel state ( $S, I, T, V$ ) yaitu sebagai berikut:

$$\dot{x}^* = \frac{\partial H}{\partial \lambda}$$

Selain variabel state juga terdapat variabel costate ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  dan  $\lambda_4$ ) pada bentuk pengontrol  $u^*(t)$ , maka perlu diselesaikan persamaan costate untuk mendapatkan persamaan costate yang optimal pada langkah kelima yaitu sebagai berikut:

$$\dot{\lambda}^* = -\frac{\partial H}{\partial x}$$

Kemudian, langkah keenam mensubstitusikan persamaan  $u^*(t)$  yang telah diperoleh ke dalam persamaan state untuk memperoleh bentuk solusi yang optimal. Berikut hasil sistem persamaan optimal yang didapatkan:

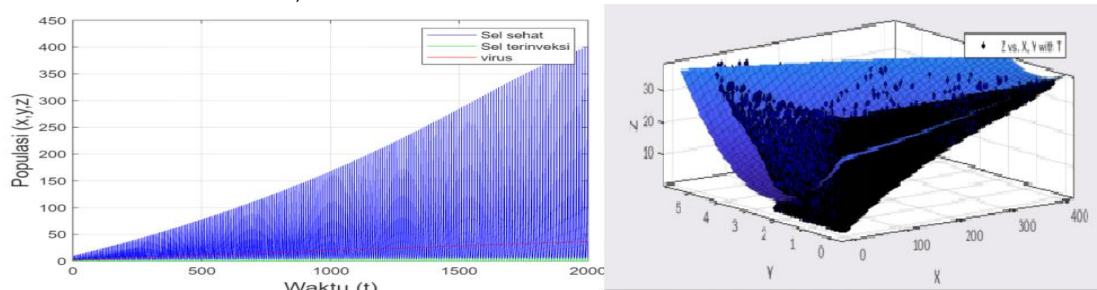
$$\dot{S} = \frac{\partial H}{\partial \lambda_1} = aS - bSI - bSV \left( \left( 1 - \left( \min \left( \max \left( 0, \frac{V(\lambda_1 bS + \lambda_3 pT)}{\gamma} \right), 1 \right) \right) \right) \right) + dS$$

$$\dot{I} = \frac{\partial H}{\partial \lambda_2} = bSI - wI - mnl - qIT$$

$$\dot{V} = \frac{\partial H}{\partial \lambda_3} = qIT - \mu T - pTV \left( \left( 1 - \left( \min \left( \max \left( 0, \frac{V(\lambda_1 bS + \lambda_3 pT)}{\gamma} \right), 1 \right) \right) \right) \right)$$

$$\dot{T} = \frac{\partial H}{\partial \lambda_4} = mnl + pTV - (c1 + c2)V$$

Berdasarkan uraian di atas, untuk mendapatkan  $S, I, T$ , dan  $V$  dari bentuk  $u^*(t)$  yang optimal maka perlu menyelesaikan persamaan state dan costate yang berbentuk nonlinier. Karena sistem persamaan nonlinier sulit untuk diselesaikan secara analitik, oleh karena itu diselesaikan secara numerik.



Gambar 2 Simulasi penyebaran virus DBD sesudah diberi pengontrol

Selanjutnya dalam simulasi berikutnya dengan menggunakan variabel kontrol yang ada sangat jelas sel virus DBD dan sel terinfeksi semakin berkurang sedangkan sel sehat semakin lama cenderung mengalami peningkatan.

#### 4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dari penelitian ini maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Model penyebaran penyakit DBD dalam tubuh manusia dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\dot{S} &= aS - bSI - bSV + dS \\ \dot{I} &= bSI - wI - mnl - qIT \\ \dot{V} &= qIT - \mu T - pTV \\ \dot{T} &= mnl + pTV - (c1 + c2)V\end{aligned}$$

2. Bentuk sistem persamaan model penyebaran penyakit DBD yang optimal dengan memaksimalkan kerja pengobatan dan meminimumkan pemberian jumlah adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\dot{S} = \frac{\partial H}{\partial \lambda_1} &= aS - bSI - bSV \left( (1 - \left( \min \left( \max \left( 0, \frac{V(\lambda_1 bS + \lambda_3 pT)}{Y} \right), 1 \right) \right) \right) + dS \\ \dot{I} = \frac{\partial H}{\partial \lambda_2} &= bSI - wI - mnl - qIT \\ \dot{V} = \frac{\partial H}{\partial \lambda_3} &= qIT - \mu T - pTV \left( (1 - \left( \min \left( \max \left( 0, \frac{V(\lambda_1 bS + \lambda_3 pT)}{Y} \right), 1 \right) \right) \right) \\ \dot{T} = \frac{\partial H}{\partial \lambda_4} &= mnl + pTV - (c1 + c2)V\end{aligned}$$

3. Simulasi hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa pengobatan yang diberikan dengan maksimum dapat meningkatkan jumlah sel sehat serta mengurangi jumlah sel yang terinfeksi DBD. Pengobatan sangat memberikan efek yang baik terhadap peningkatan sel sehat.

4. Penelitian ini hanya membahas tentang laju pertumbuhan sel yang konstan, disarankan pada penelitian berikutnya untuk meneliti persamaan yang membahas tentang laju pertumbuhan sel yang tidak konstan dengan menggunakan kombinasi kontrol dengan treatment yang berbeda.

#### 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada ULM yang telah mendanai Penelitian melalui DIPA Universitas Lambung Mangkurat Tahun Anggaran 2021 No: SP DIPA 023.17.2.67775518/2021 tanggal 23 November 2020 Universitas Lambung Mangkurat Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Sesuai dengan SK Rektor Universitas Lambung Mangkurat Nomor : 697/UN8/PG/2021 Tanggal 22 Maret 2021.11.21.

#### 6. DAFTAR PUSTAKA

- Affandi, P., Faisal 2018. Optimal control mathematical SIR model of malaria spread in South Kalimantan, Journal of Physics: Conference Series 1116 (2), 02200.
- Affandi, P., 2020. Optimal control for dysentery epidemic model with treatment, International Journal of Scientific and Technology Research, 2020, 9(3).
- Affandi, P., Salam N 2021. Optimal Control of diarrhea Disease model with Vaccination and Treatment, Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1807(1), 012032.
- Affandi P., Faisal. (2017). Optimal Control Model of Malaria Spread in South Kalimantan, Halaman 54-61.
- Affandi, P., 2017. Kendali Optimal pada Penentuan Interval Waktu dan Dosis Optimal pada Penyakit Malaria. <https://publikasi.ilmiah.ums.ac.id/handle/11617/10150>.
- Affandi, P., 2019. Kendali Optimal Pada Model Penyakit Scabies. Konferensi Pendidikan Nasional 1 (1), 187-196.
- Kermack, W. O. and McKendrick, A. G., 1927. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics, Royal Society.
- Bellomo, N. & L. Preziosi. 1995. Modelling Mathematical Method and Scientific Computation. CRC press. Florida.
- Affandi, P., 2015, Optimal Inventory Control Stochastic With Production Deteriorating. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 300 (2018) 012019 doi:10.1088/1757-899X/300/1/012019.
- Affandi, P., 2015, Optimal Inventory Control System With Stochastic Demand. Ethar, Indonesia. 2016(3), 302 – 313.
- Affandi, P., 2015, Application Optimal Control Theory for Inventory Production System. Proceedings of International Conference on NAMES 2015.
- Affandi, P., Salmah, 2014, Perluasan Model Kendali Optimal Sistem Pergudangan Dengan Produksi Yang Mengalami Kemerosotan. Prosiding UAD, Yogyakarta.



- Affandi, P., Faisal & Yulida, Y. 2015. Kendali Optimal dari Sistem Inventori dengan Peningkatan dan Penurunan Barang. Jurnal MIPA 38 (1) (2015): 79-88.
- Braun, M. 1992. Differential Equation and Their Application-Fourth Edition. John Wiley & Sons. New York.
- Burghes, D.N. 1980. Introduction to Control Theory Including Optimal Control. Springer-Verlag. New York.
- Dumont, Y., dan Chiroleu, F.,, 2010, Vector Control for the Chikungunya.Disease, Mathematical Biosciences and Engineering, 7, 313-345.
- Data Profil Kesehatan Propinsi Kalimantan tahun 2019.
- Farlow, S.J.1994. An Introduction to Differential Equation and Their Applications. Dover Publications, United States of America.
- Gantmacher, F.R. 1959. The Theory of Matrices. Chelsea Publishing Company. New York.
- Katrina Pareallo, W. Sanusi, 2018. Kontrol optimal pada model epidemik SIR penyakit demam berdarah Indonesian Journal of Fundamental Sciences Vol.4, No.2, October 2018.
- Laporan Dinas Kesehatan Kota Banjarmasin. Kasus DBD Di Kota Banjarmasin Tahun 2013-2016. Banjarmasin: Dinas Kesehatan Kota Banjarmasin Provinsi Kalimantan Selatan; 2016.
- Lotfi Tadj, A.M Sarhan, Awad El-Gohary Optimal control of an inventory system with ameliorating and deteriorating items. Applied Sciences 243-255.
- Perko, L. 1991.Differential Equation an Dynamical systems. Text in Applied Mathematic vol Springer-Verlag, New York, USA.
- Puntani Pongsumpun1., 2019. Optimal control of the dengue dynamical transmission with vertical transmission. Advances in Diffrence Equations. A Springer open Journal.
- Rodrigues, H.S., Monteiro, M.T.T., dan Torres, D.F.M., 2010, Insecticide Control in a Dengue Epidemics Model, Numerical Analysis and Applied Mathematics, 1281, 979-982.
- Sheng-Qun Deng., Xian Yang., 2020. A Review on Dengue Vaccine Development, National Library of Medicine.

