

Kendali Optimal Penggunaan Kelambu Pada Pencegahan Malaria di Papua

Nilwan Andiraja¹

¹Program Studi Matematika, Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

¹nilwanandiraja@uin-suska.ac.id

ABSTRAK

Kasus malaria di Papua terus ada dan banyak karena bentangan alam dengan iklim lembab mendukung perkembangbiakan nyamuk *Anopheles* betina. Hal ini diperparah dengan kondisi sosial masyarakat Papua yang masih tinggal dekat dengan alam dengan kondisi rumah yang terbuka. Hal ini menyebabkan masyarakat Papua sangat rentan terinfeksi malaria. Sehingga untuk mengantisipasi hal tersebut tidak hanya diperlukan pengobatan tapi juga diperlukan pencegahan dengan penggunaan kelambu untuk mencegah dan mengendalikan penyebaran malaria. Penelitian ini bertujuan untuk meneliti dan menganalisis efektif atau tidak penggunaan kelambu untuk pencegahan malaria di daerah terbanyak kasus malaria yaitu Papua. Oleh karena itu, penelitian ini membuat model matematika baru dengan menambah kendali penggunaan kelambu kedalam model matematika terdahulu penyebaran malaria di Papua. Dengan *Pontryagin Principle* didapat kendali optimal dan selanjutnya dengan metode *sweep forward-backward* dilakukan simulasi numerik. Hasil dari simulasi numerik menunjukkan bahwa penggunaan kelambu efektif menurunkan jumlah individu rentan terkena malaria yang otomatis menurunkan jumlah individu terinfeksi malaria.

Kata Kunci: Kelambu; Kendali; Malaria; Papua; Sweep.

ABSTRACT

The malaria cases in Papua always exist and massive because the natural landscape with high humidity supports reproduction of female *Anopheles* mosquito. This condition becomes worst by social condition of Papua communities which is still leaving close to the natural with condition of house not cover properly by wall or window. It is causing the Papua people greatly vulnerable to be infected. So, for anticipation this condition, we not only use drug for therapy but also use preventive action by used of bed net for controll spread of malaria. This research aims to examine and analyze whether bed net effective or not to prevent spread of malaria in Papua as area with highest malaria case. Therefore, this research made a new mathematical model with addition a control of used a bed net to the previous mathematical model spread of malaria in Papua. With the Pontryagin Principle obtain a optimal control and then the sweep forward-backward method conducted numerical simulation. It showed, used of bed net is effective to decrease number of individual susceptible which is automatically decrease the number of malaria infected.

Keywords: Bed net; Control; Malaria; Papua; Sweep.

PENDAHULUAN

Malaria adalah penyakit yg diakibatkan oleh parasit genus *Plasmodium* yang ditularkan melalui gigitan nyamuk *Anopheles* betina. Penyakit ini menyerang organ seperti otak, hati dan ginjal sehingga mengakibatkan parasit tumbuh dan berkembangbiak di dalamnya. Saat parasite tumbuh dan menjadi dewasa, parasit dapat menembus organ tersebut dan merusak sel darah merah. Kerusakan tersebut pada sel darah merah dapat menimbulkan gejala anemia, demam dan pembesaran limpa pada penderita (Ishak, Firmansyah, Setiawan, & Nur, 2024). Kerusakan-kerusakan yang di timbulkan oleh malaria ini selain dapat menimbulkan kerusakan pada kesehatan penderita tapi juga dapat menimbulkan efek serius yaitu kematian. Hal ini mengakibatkan setiap tanggal 25 April

setiap tahun selalu diperingati sebagai bulan malaria sedunia sebagai pengingat bagi warga dunia bahwa malaria masih terus ada dan terus menjadi ancaman yang nyata bagi kesehatan manusia.

Di Indonesia, malaria juga terus menjadi permasalahan penyakit yang serius karena setiap tahun terus terjadi kasus malaria dan jumlahnya cukup banyak. Mayoritas kasus malaria terjadi di Wilayah Indonesai bagian Timur seperti Provinsi Papua dan Papua Tengah. Di tanah Papua, malaria sanat mudah berkembang biak dan mengancam kesehatan dan bahkan nyawa penduduk Papua karena kondisi alam Papua yang berawa, banyak kebun dan hutan dengan iklim lembab yang mendukung perkembangbiakan nyamuk *Anopheles betina*. Ditambah lagi, kondisi sosial masyarakat Papua yang tinggal dekat dengan alam dengan perumahan yang terbuka yang memudahkan nyamuk masuk kedalam rumah, kebiasaan tidak disiplin dalam berobat dan tidak memiliki kebiasaan memakai kelambu untuk perlindungan diri dari gigitan nyamuk. Hal ini tentu menjadi tantangan yang serius bukan hanya bagi Papua tapi tentu Indonesia karena adanya target nasional dari pemerintah Indonesia yang ditetapkan pada tahun 2022 untuk eliminasi malaria ditahun 2030. Oleh karena itu perlu adanya upaya bersama antara pemerintah Indonesia, pemerintah daerah di Papua dan tentu masyarakat Papua. Berbagai upaya atau strategi kendali bisa dilakukan untuk mengendalikan bahkan mengeliminasi malaria dari Indonesia umumnya dan Papua khususnya. Strategi kendali tersebut seperti obat anti nyamuk, insektisida nyamuk, pemasangan kawat kasa di rumah, pemakaian kelambu, peningkatan kesadaran masyarakat akan bahaya malaria serta pencegahannya, dan pengobatan bagi penderita malaria, perlu diteliti keefektifannya dalam pencegahan malaria dan selanjutnya diterapkan dilapangan.

Sistem kendali dinamik merupakan salah satu alat yang dapat digunakan untuk mempelajari persoalan-persoalan dalam dunia nyata seperti penyebaran penyakit dan menganalisa dengan tepat keefektifan berbagai strategi kendali untuk pencegahannya. Sebelumnya perlu dibentuk terlebih dahulu model matematika untuk memodelkan penyebaran penyakit tersebut. Berbagai penelitian yang membahas penyebaran malaria diantaranya adalah model matematika berbentuk S-IAS-SI yang meneliti penyebaran malaria asimtomatik dengan super infeksi tapi pada penelitian ini belum ada ditemukan satupun kendali untuk mengendalikan malaria, penelitian ini hanya memberikan prediksi jumlah penderita malaria di suatu wilayah untuk acuan pemerintah dalam menanggulangnya (Abdy, Maryam, & Sanusi, 2022). Penelitian lain model matematika dengan penyuluhan masyarakat telah dilakukan dengan hasil bahwa penyadaran masyarakat masih perlu upaya lebih baik lagi (Banni, Kleden, Lobo, & Ndi, 2021). Model matematika penyebaran malaria dengan musim nyamuk juga sudah dilakukan dengan hasil musim nyamuk mengakibatkan naik turunnya kasus malaria hal ini karena belum ada kendali untuk meminimalisir penyebaran malaria (Rafli & Prawoto, 2025). Semua penelitian ini hanya untuk memodelkan secara matematika malaria tapi tidak satupun menyertakan kendali untuk membantu meminimalisir penyebaran malaria. Padahal perlu dilakukan upaya kendali untuk mecegah penyebarannya.

Berbagai penelitian atau pengabdian dalam rangka mencegah penyebaran malaria diantaranya pengendalian Malaria melalui Program Flying Health Care (FHC) di Kabupaten Yahukimo, Provinsi Papua dengan hasil bahwa penanganan penyebaran malaria masih didasarkan perkusus (Ramadhani, Amirullah, & Rahmat, 2021). Kemudian penelitian tentang keefektifan pusat malaria di Papua, menghasilkan adanya efek positif (Setianingsih & Sulistyaningrum, 2025). Penelitian yang lain berkaitan dengan faktor lingkungan sangat berperan dalam penyebaran malaria (Manangsang, Ganing, Purba, Rumaseb, & Sarwadhamana, 2021). Salah satu penelitian hubungan perilaku masyarakat atau kesadaran masyarakat tentang bahaya malaria dengan tingkat penyebaran malaria telah dilakukan

dengan hasil perilaku akan bergantung dengan tingkat terinfeksi malaria (Mufara & Wahyono, 2023)(Tami et al., 2025). Selanjutnya penggunaan kelambu untuk pencegahan malaria telah dilakukan tapi belum ada analisa keefektifannya (Priyoto & Widyaningrum, 2024). Semua penelitian atau pengabdian ini telah dilakukan tapi pada umumnya belum ada analisa ilmiah tentang kendali optimal dalam pencegahan malaria.

Penelitian tentang kendali optimal untuk malaria telah dilakukan diantaranya model matematika dan kendali optimal pengobatan dan kesadaran manusia dengan hasil bahwa perlu dilakukan penguatan fasilitas kesehatan dan kesadaran akan bahaya malaria dalam pencegahan malaria (Jaleta, Duressa, & Deressa, 2023). Penelitian yang lain yaitu kendali pengasapan dan pengobatan di rumah sakit untuk menurunkan tingkat individu terinfeksi malaria (Aldila & Angelina, 2021). Kemudian penelitian pencegahan malaria kombinasi penggunaan kesadaran manusia, vaksin, dan pengobatan juga dilakukan (Kumar, Saha, & Nath, 2025). Semua penelitian ini telah dilakukan dengan hasil bahwa pencegahan malaria dapat dilakukan sesuai dengan kendali yang diteliti tapi penelitian ini belum meneliti di daerah terparah yaitu Papua dan belum meneliti penggunaan kelambu untuk pencegahan malaria. Penelitian keandalan kelambu dalam mencegah malaria di Papua perlu dilakukan karena pemakaian kelambu merupakan cara efektif untuk perlindungan diri dari gigitan nyamuk *Anopheles* betina. Berdasarkan data WHO tahun 2007, pemakaian kelambu di negara Afrika Selatan terbukti efektif menurunkan kasus malaria. Penelitian penggunaan kelambu telah dilakukan bersama kombinasi dengan pengasapan (Handari, Vitra, Ahya, S, & Aldila, 2019). Penelitian yang lain dengan kombinasi kendali penggunaan kelambu, pengobatan, dan penggunaan spray anti nyamuk (Keno, Dano, & Makinde, 2022). Namun kedua penelitian tersebut belum meneliti di daerah Papua.

Penelitian malaria di Papua telah dilakukan dengan kendali vaksinasi dan obat pencegah penularan malaria (Handari, Ramadhani, Chukwu, Khoshnaw, & Aldila, 2022) dan (Ihsan, Side, & Pagga, 2021) yang telah meneliti penyebaran malaria di Papua. Pada penelitian tersebut menghasilkan bahwa vaksinasi dan obat dapat menyembuhkan malaria tapi belum meneliti keandalan penggunaan kelambu untuk mencegah malaria karena diketahui bahwa penggunaan obat belum tentu mencegah individu terkena kembali karena efektivitas obat dan vaksin akan menurun seiring waktu dan membutuhkan biaya yang banyak. Oleh karena itu, perlu diteliti keefektifan penggunaan kelambu selain pemberian pengobatan, atau penggunaan desinfektan ataupun pengasapan, hal ini karena penggunaan kelambu lebih praktis tidak mencemari lingkungan dan telah terbukti penggunaannya di negara lain menurunkan kasus malaria. Penelitian ini meneliti pencegahan malaria di daerah Papua yang merupakan daerah yang penduduknya terbanyak menderita malaria di Indonesia. Pada penelitian ini akan menggunakan kendali penggunaan kelambu untuk pencegahan malaria di Papua dengan menggunakan model matematika yang telah ada agar didapat perbandingan hasil dengan penelitian terdahulu. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa keefektifan penggunaan kelambu untuk menurunkan jumlah individu terinfeksi malaria di Papua. Sehingga dengan hasil penelitian ini, diharapkan memberikan kontribusi dalam upaya pencegahan dan penurunan kasus malaria di Papua sehingga target nasional Indonesia bebas malaria 2030 terwujud.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif karena pada penelitian ini mengembangkan model matematika terdahulu tentang pemodelan penyebaran malaria di Papua khususnya Kabupaten Mimika Papua (Ihsan et al., 2021). Pengembangan yang akan dilakukan yaitu penambahan kendali (penggunaan kelambu) pada model matematika yang sudah ada pada penelitian (Ihsan et al., 2021),

$$\begin{aligned}
\frac{dS(t)}{dt} &= \pi + \gamma R(t) - (\mu + \beta I)S \\
\frac{dE(t)}{dt} &= \beta IS - (\mu + \omega + \delta)E \\
\frac{dI(t)}{dt} &= \delta E - (\mu + \alpha + \sigma)I \\
\frac{dR(t)}{dt} &= \sigma I + \omega E - (\mu + \gamma)R
\end{aligned} \tag{1}$$

dengan : $N(t) = S(t) + E(t) + I(t) + R(t)$

Adapun asumsi yang digunakan untuk memodelkan penyebaran penyakit malaria, yaitu terdapat kelahiran dan kematian dalam suatu populasi, proses kematian dapat terjadi pada kelas $S(t), E(t), I(t)$, dan $R(t)$, setiap individu yang lahir akan menjadi rentan, penyakit dapat disembuhkan (individu yang telah sembuh memiliki sistem imun sementara), semua individu mempunyai peluang yang sama untuk terinfeksi, penanganan atau pengobatan dilakukan pada individu *exposed*.

Kendali ini akan disimbolkan dengan $u(t)$ yang selanjutnya akan di sombolkan dengan u . Kendali u akan ditambahkan ke grup/ kelas $S(t)$ (*Susceptible*) atau kelas rentan. Hal ini dilakukan karena u yaitu penggunaan kelambu bertujuan mencegah secepat mungkin setiap individu untuk digigit oleh nyamuk pembawa malaria *Anopheles betina* (Handari et al., 2019)(Keno et al., 2022). Selanjutnya akan dibentuk fungsi tujuan dengan memasukkan kelas $I(t)$ (*Infected*) atau kelas terinfeksi dan kendali u . Pada penelitian ini akan dicari kendali optimal u dan meminimalisir jumlah individu terinfeksi malaria. Sehingga untuk mendapatkan hasil tersebut, perlu diaplikasikan *Pontryagin Principle*, dengan dibentuk fungsi Hamiltonian yang terbentuk berdasarkan sistem diferensial model matematika dan fungsi tujuan. Fungsi Hamiltonian penting untuk dibentuk karena dari fungsi tersebut akan dapat dibentuk persamaan *costate* dan akan didapatkan kendali u yang optimal. Persamaan *costate* dan u optimal penting dalam langkah perhitungan dan analisa selanjutnya tentang keefektifan penggunaan kelambu untuk menurunkan jumlah individu terinfeksi malaria.

Setelah mendapatkan Persamaan *costate* dan u optimal, kemudian perlu dibentuk iterasi untuk melakukan perhitungan secara numerik menggunakan metode *sweep forward-backward* dengan bantuan Runge-Kutta orde 4. Bentuk Numerik untuk *forward step* dibentuk untuk persamaan *state* dan *backward step* untuk *costate*. Selanjutnya dengan nilai-nilai parameter yang didapat dari (Ihsan et al., 2021) akan dilakukan simulasi numerik. Simulasi numerik yang dilakukan akan memberikan grafik hasil untuk ke-empat grafik kelas. Terakhir, setelah didapat grafik kelas $S(t), E(t), I(t)$, dan $R(t)$, akan dianalisa dan diinterpretasi hasil untuk menggambarkan keefektifan penggunaan kendali u (penggunaan kelambu) untuk mencegah penyebaran penyakit malaria di Papua.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan pada penelitan ini dimulai dengan dibentuk model matematika baru untuk penyebaran malaria dengan penambahan kendali u ke Persamaan (1). Penambahan kendali diberikan kedalam kelas *susceptible*. Maka dibentuk sistem persamaan diferensial yang selanjutnya disebut persamaan *state*, sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
\frac{dS(t)}{dt} &= \pi + \gamma R(t) - (\mu + \beta I(t)(1 - u))S(t) \\
\frac{dE(t)}{dt} &= \beta I(t)(1 - u)S(t) - (\mu + \omega + \delta)E(t)
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}\frac{dI(t)}{dt} &= \delta E(t) - (\mu + \alpha + \sigma)I(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} &= \sigma I(t) + \omega E(t) - (\mu + \gamma)R(t).\end{aligned}$$

Selanjutnya, dengan tujuan dalam penelitian ini untuk meminimalkan populasi terinfeksi malaria dengan penerapan kendali, maka dibentuk fungsi tujuan yaitu,

$$J(u) = \int_0^{T_f} (c_1 I(t) + c_2 u^2) dt$$

dengan c_1 dan c_2 adalah nilai parameter yang penting bagi fungsi tujuan. Kemudian, sesuai dengan *Pontryagin Principle*, dibentuk fungsi Hamiltonian berdasarkan persamaan *state* pada persamaan (2) dan fungsi tujuan, yaitu

$$\begin{aligned}H &= (c_1 I(t) + c_2 u^2) + \lambda_1 (\pi + \gamma R(t) - (\mu + \beta I(t)(1 - u))S(t)) \\ &\quad + \lambda_2 (\beta I(t)(1 - u)S(t) - (\mu + \omega + \delta)E(t)) + \lambda_3 (\delta E(t) - (\mu + \alpha + \sigma)I(t)) \\ &\quad + \lambda_4 (\sigma I(t) + \omega E(t) - (\mu + \gamma)R(t)).\end{aligned}$$

Berdasarkan fungsi Hamiltonian diatas, diperoleh persamaan *costate*, dengan menurunkan fungsi Hamiltonian secara parsial terhadap setiap variabel *state* yaitu

$$\begin{aligned}\frac{d\lambda_S}{dt} &= -(\lambda_1 (\mu + \beta I(t)(1 - u)) + \lambda_2 (\beta I(t)(1 - u))) \\ \frac{d\lambda_E}{dt} &= -(\lambda_2 (-(\mu + \omega + \delta)) + \lambda_3 (\delta) + \lambda_4 \omega) \\ \frac{d\lambda_I}{dt} &= -(c_1 - \lambda_1 (\beta S(t) - \beta u S(t)) + \lambda_2 (\beta (1 - u)S(t)) - \lambda_3 (\mu + \alpha + \sigma)I(t) \\ &\quad + \lambda_4 \sigma) \\ \frac{d\lambda_R}{dt} &= -(\lambda_1 (\gamma) - \lambda_4 (\mu + \gamma))\end{aligned}\tag{3}$$

Selanjutnya dari fungsi Hamiltonian juga akan dicari kendali optimal. Kendali optimal akan diperoleh dengan menurunkan fungsi Hamiltonian secara parsial terhadap variabel kendali u , sehingga diperoleh,

$$\frac{dH}{du} = \frac{\beta IS(t)}{2c_2} (\lambda_E - \lambda_S),$$

kendali optimal dapat dinyatakan dengan,

$$u^* = \max \left(0, \min \left(1, \frac{\beta IS(t)}{2c_2} (\lambda_E - \lambda_S) \right) \right).\tag{4}$$

Kendali optimal yang diperoleh pada persamaan (4) merupakan kendali optimal untuk pencegahan penyebaran malaria dengan Persamaan *state* (2) dan Persamaan *costate* (3).

Simulasi Numerik

Pada bagian ini akan dilakukan simulasi numerik untuk mendapatkan grafik hasil semua kelas $S(t)$, $E(t)$, $I(t)$, dan $R(t)$. Hasil grafik tersebut akan digunakan untuk menganalisa pengaruh kendali u . Kendali pada penelitian ini diperoleh terdapat pada Persamaan (3) dengan model malaria memiliki sistem persamaan *state* (1), dan fungsi Hamiltonian diperoleh Persamaan *costate* (2). Sebelum dilakukan simulasi, maka perlu diperoleh solusi Persamaan *state* dan Persamaan *costate*. Diketahui bentuk kedua persamaan tersebut adalah nonlinier yang tidak bisa diselesaikan secara proses analitik langsung. Sehingga, kedua persamaan *state* (1) dan persamaan *costate* (2) tersebut akan diselesaikan

menggunakan metode *sweep forward-backward*. Adapun langkah-langkah iterasi proses numerik sebagai berikut :

Langkah 1 : Diambil tebakan awal nilai u^* untuk $t \in [0, T_f]$.

Langkah 2 : Digunakan nilai awal nilai u^* pada langkah 1 untuk persamaan state, kemudian diselesaikan *forward-step* untuk sistem persamaan *state* menggunakan skema Runge Kutta orde 4.

Langkah 3 : Dengan menggunakan nilai batas *costate* $\lambda(T_f) = 0$ dan nilai kendali u dan nilai *state* dari langkah 2, diselesaikan *backward-step* untuk persamaan *costate* menggunakan skema Runge Kutta orde 4.

Langkah 4 : Diulang langkah iterasi dengan memperbaharui nilai u^* dengan memasukkan nilai *state* dan *costate* yang baru ke Persamaan (4).

Berdasarkan langkah-langkah iterasi diatas, maka selanjutnya dilakukan simulasi numerik dengan menggunakan nilai-nilai parameter yang diperoleh dari penelitian terdahulu (Ihsan et al., 2021). Adapun nilai-nilai parameter diberikan pada tabel 1 berikut :

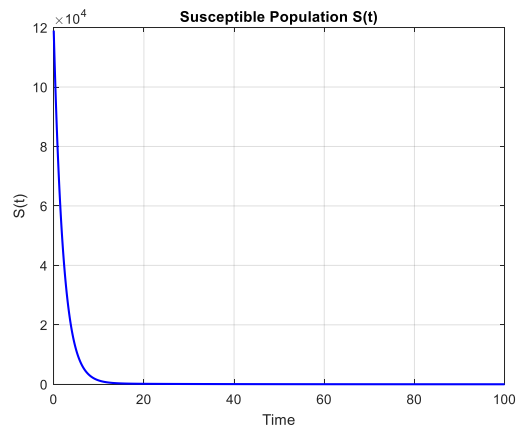
Tabel 1. Variabel dan Parameter

Variabel	Keterangan	Nilai
$S(t)$	Jumlah individu yang rentan	118.983
$E(t)$	Jumlah individu yang mengalami gejala namun belum terinfeksi	42.653
$I(t)$	Jumlah individu yang terinfeksi dan dapat menularkan penyakit	49.503
$R(t)$	Jumlah individu yang sembuh	8.362
π	Laju kelahiran	0,045
δ	Laju individu yang terinfeksi	0,358
β	Laju individu menjadi individu laten karena adanya gigitan nyamuk terinfeksi	0,416
μ	Laju kematian	0,045
α	Kematian akibat penyakit malaria	0,831
γ	Laju konstan hilangnya kekebalan tubuh pada manusia setelah pulih	0,001
ω	Efektivitas pengobatan pada manusia	1
σ	Laju pemulihan	0,5

Simulasi numerik ini dilakukan agar didapatkan perbandingan hasil dengan penelitian terdahulu yang belum diberikan kendali u yaitu penggunaan kelambu dengan penelitian ini yang kelas $S(t)$ (*Susceptible*) telah diberikan kendali u . Oleh karena itu data-data yang akan digunakan adalah data-data yang diperoleh dari penelitian terdahulu (Ihsan et al., 2021), data-data tersebut dapat dilihat pada tabel 1. Selain data-data pada tabel 1, simulasi numerik di penelitian ini data waktu akan dilakukan untuk waktu $t \in [0, 100]$, waktu pada penelitian ini menunjukkan banyaknya bulan. Simulasi numerik pada penelitian menggunakan *software* Matlab. Hasil-hasil garfik untuk setiap kelas dapat dilihat pada Gambar 1 untuk Grafik kelas $S(t)$ (*Susceptible*).

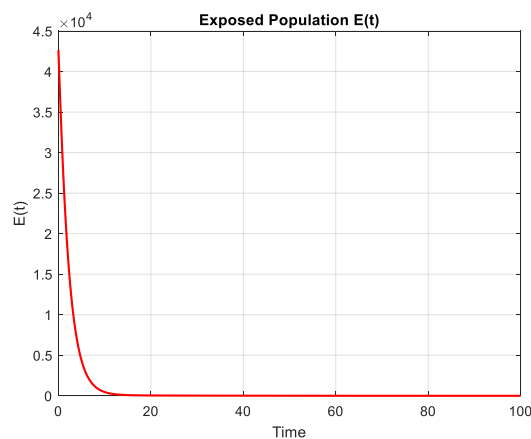
Pada Gambar 1 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan signifikan jumlah individu yang rentan terkena gigitan nyamuk *Anopheles* betina pembawa malaria. Hal ini terjadi karena penggunaan kelambu secara matematis dapat mencegah individu untuk terkena gigitan nyamuk, sehingga individu tidak menjadi rentan terkena malaria. Dimulai dari waktu kurang

dari 20 bulan terjadi penurunan dan selanjutnya sampai waktu 100 bulan, konstan tidak terjadi individu terkena gigitan nyamuk.



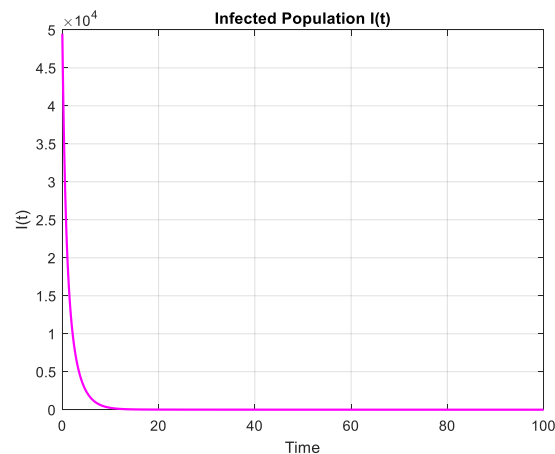
Gambar 1. Grafik kelas $S(t)$ (*Susceptible*)

Pada gambar 2, diberikan hasil grafik kelas $E(t)$ (*Exposed*) setelah kelas $S(t)$ (*Susceptible*) diberi kendali. Berdasarkan grafik di gambar 2 dapat dilihat terjadi juga penurunan jumlah individu yang ter-*exposed* (terpapar) malaria. Hal ini karena pengaruh dari kelas $S(t)$ (*Susceptible*) yang terdapat penurunan individu yang terkena gigitan nyamuk. Sehingga penurunan jumlah individu yang terkena gigitan nyamuk maka akan menurunkan juga jumlah individu yang terpapar malaria. Dimulai dari waktu kurang dari 20 bulan terjadi penurunan dan selanjutnya sampai waktu 100 bulan, konstan tidak terdapat individu terpapar malaria.

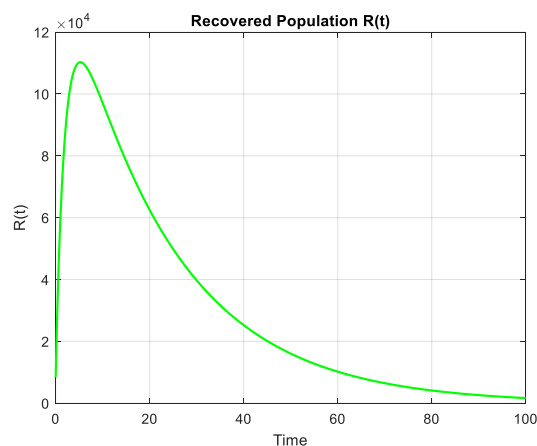


Gambar 2. Grafik kelas $E(t)$ (*Exposed*)

Pada gambar 3, juga diberikan grafik untuk kelas $I(t)$ (*Infected*). Pada grafik di gambar 3 tampak menghasilkan hasil yang sama dengan kedua grafik kelas terdahulu kelas $S(t)$ (*Susceptible*) dan $E(t)$ (*Exposed*) yaitu terjadi penurunan signifikan jumlah individu terinfeksi malaria. Hal ini dapat dipahami dengan baik karena grafik kelas $I(t)$ (*Infected*) dipengaruhi oleh dua kelas sebelumnya kelas $S(t)$ (*Susceptible*) dan $E(t)$ (*Exposed*). Diketahui bahwa terjadi penurunan jumlah individu yang terkena gigitan nyamuk Anopheles betina pembawa malaria mengakibatkan penurunan jumlah individu terpapar malaria sehingga akan menurunkan jumlah penderita malaria. Hasil ini juga terjadi penurunan kurang dari 20 bulan dan selanjutnya sampai 100 bulan tidak ada individu yang terinfeksi malaria.

Gambar 3. Grafik kelas $I(t)$ (Infected)

Selanjutnya, pada gambar 4 diberikan grafik kelas $R(t)$ (Recovered). Pada gambar 4 dapat dilihat bahwa sempat terdapat peningkatan jumlah individu yang sembuh, hal ini terjadi karena pada waktu awal $t = 0$ aplikasi kendali yaitu penggunaan kelambu baru diterapkan sehingga dapat dipahami terdapat individu yang sudah tergigit nyamuk Anopheles betina pembawa malaria sebelumnya sehingga dilakukan pengobatan (ω). Setelah dilakukan pengobatan maka individu akan mengalami pemulihan dengan laju pemulihan (σ). Selanjutnya setelah sembuh dari malaria, maka sejak sembuh dari malaria individu yang telah menggunakan kelambu tidak akan lagi terkena gigitan nyamuk. Hal ini mengakibatkan terjadi penurunan kurang dari 20 bulan atau sejak terakhir individu sembuh dari malaria. Penurunan ini terjadi karena berdasarkan gambar 3 tidak ada individu yang terinfeksi malaria yang berarti tidak ada individu yang akan disembuhkan dari malaria. Kondisi ini terjadi sampai bulan ke 100.

Gambar 4. Grafik kelas $R(t)$ (Recovered)

Berdasarkan grafik akhir dari simulasi untuk keempat kelas $S(t)$, $E(t)$, $I(t)$, dan $R(t)$ dapat disimpulkan bahwa kendali u yaitu penggunaan kelambu sangat bermanfaat untuk menurunkan jumlah individu penderita malaria. Bahkan dari grafik $R(t)$ (Recovered) yang terjadi penurunan jumlah individu yang perlu diobati malaria akan memberikan arti bahwa akan terjadi efisiensi atau penurunan penggunaan dana untuk pengadaan obat anti

malaria. Hasil ini dapat dikatakan lebih baik dari hasil yang diperoleh (Ihsan et al., 2021) karena pada hasil pada (Ihsan et al., 2021) jumlah individu yang rentan (kelas $S(t)$) masih terjadi peningkatan dan tidak terjadi penurunan. Kemudian hasil pada penelitian ini sejalan dengan penelitian (Priyoto & Widyaningrum, 2024)(Handari et al., 2019)(Keno et al., 2022), bahwa penggunaan kelambu dapat menjadi salah satu upaya yang dapat mengendalikan penyebaran malaria bahkan mampu untuk menurunkan jumlah penderita malaria.

PENUTUP

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan model matematika SEIR penyebaran malaria menjadi model matematika SEIR yang baru dengan menambahkan kendali u yaitu penggunaan kelambu di kelas $S(t)$ (*susceptible*) atau rentan terkena gigitan nyamuk. Kemudian penelitian ini juga membuat fungsi tujuan baru yaitu meminimalkan jumlah individu terinfeksi malaria. Berdasarkan pembahasan, menunjukkan bahwa pemberian kendali yaitu penggunaan kelambu dapat menurunkan jumlah individu rentan dari malaria karena penggunaan kelambu dapat mencegah individu untuk digigit oleh nyamuk Anopheles betina. Selain kelas $S(t)$ (*susceptible*), kendali penggunaan kelambu juga dapat menurunkan jumlah individu ter-*exposed*, terinfeksi malaria, dan individu sembuh dari malaria. Hasil ini lebih baik dari penelitian terdahulu yang menjadi rujukan model matematika karena penelitian terdahulu tersebut jumlah individu yang rentan masih mengalami kenaikan. Hasil penelitian ini memberikan alternatif upaya untuk mengendalikan penyebaran malaria di Papua yaitu penggunaan kelambu. Penggunaan kelambu sesuai dengan hasil pada penelitian ini dapat menurunkan bahkan mampu menghabiskan individu yang terinfeksi malaria.

REFERENSI

- Abdy, M., Maryam, H., & Sanusi, W. (2022). Pemodelan Matematika SIAS-SI pada Penyebaran Penyakit Malaria Asimtomatik dan Super Infeksi. *SAINTIFIK: Jurnal Matematika, Sains, Dan Pembelajarannya*, 8(1), 1–9. <https://doi.org/10.31605/saintifik.v8i1.360>
- Aldila, D., & Angelina, M. (2021). Optimal control problem and backward bifurcation on malaria transmission with vector bias. *Helicon*, 7(4), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.helicon.2021.e06824>
- Banni, E. M., Kleden, M. A., Lobo, M., & Ndi, M. Z. (2021). Estimasi Reproduction Number Model Matematika Penyebaran Malaria di Sumba Tengah, Indonesia Ervin. *Jambura Journal of Biomathematics*, 2(1), 13–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.34312/jjbm.v2i1.9971>
- Handari, B. D., Ramadhani, R. A., Chukwu, C. W., Khoshnaw, S. H. A., & Aldila, D. (2022). An Optimal Control Model to Understand the Potential Impact of the New Vaccine and Transmission-Blocking Drugs for Malaria : A Case Study in Papua and West Papua , Indonesia. *Vaccines*, 10, 1–29. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/vaccines10081174>
- Handari, B. D., Vitra, F., Ahya, R., S, T. N., & Aldila, D. (2019). Optimal control in a malaria model : intervention of fumigation and bed nets. *Advances DifferenceEquations*, 6, 1–125. <https://doi.org/10.1186/s13662-019-2424-6>
- Ihsan, H., Side, S., & Pagga, M. (2021). Pemodelan matematika SEIRS pada penyebaran penyakit malaria di Kabupaten Mimika. *Journal of Mathematics Computations and Statistics*, 4(1), 21–29. <https://doi.org/10.35580/jmathcos.v4i1.20446>
- Ishak, P., Firmansyah, F., Setiawan, A., & Nur, N. H. (2024). Analisis Faktor Risiko Kejadian Malaria Dan Pengobatannya Diwilayah Kerja Puskesmas Perawatan Yenburwo Distrik Numfor Timur Kabupaten Biak Numfor Papua Tahun 2023.

- Pharmacology And Pharmacy Scientific Journals*, 3(1), 7–16.
<https://doi.org/10.51577/papsjournals.v3i1.515>
- Jaleta, S. F., Duressa, G. F., & Deressa, C. T. (2023). A mathematical modeling and optimal control analysis of the effect of treatment-seeking behaviors on the spread of malaria. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 1–18.
<https://doi.org/10.3389/fams.2025.1552384>
- Keno, T. D., Dano, L. B., & Makinde, O. D. (2022). Modeling and Optimal Control Analysis for Malaria Transmission with Role of Climate Variability. *Hindawi Computational and Mathematical Methods*, 2022, 1–18.
<https://doi.org/10.1155/2022/9667396>
- Kumar, A., Saha, S., & Nath, C. (2025). Optimal control and cost-effectiveness analysis of a fractional order drug-resistant malaria transmission model with recovered carriers. *MedRxiv*, 1–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1101/2025.05.22.25328145> ;
- Manangsang, F., Ganing, A., Purba, E. R. V., Rumaseb, E., & Sarwadhmana, R. J. (2021). Analisis Faktor Risiko Lingkungan terhadap Kejadian Malaria di Kabupaten Kerom Provinsi Papua. *Indonesian Journal of Hospital Administration*, 4(2), 1–7.
[https://doi.org/10.21927/ijhaa.2021.4\(2\).37-42](https://doi.org/10.21927/ijhaa.2021.4(2).37-42)
- Mufara, C. N., & Wahyono, T. Y. M. (2023). Faktor Perilaku Pencegahan Terhadap Kejadian Malaria di Papua: Analisis Riskesdas 2010-2018. *Media Publikasi Promosi Kesehatan Indonesia The Indonesian Journal of Health Promotion*, 6(5), 901–911.
- Priyoto, P., & Widyaningrum, D. A. (2024). Penyuluhan Tentang Pencelupan Kelambu Berinsektisida Dalam Upaya Mencegah Malaria di Desa Gemarang Kabupaten Madiun 2024. *JGEN: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 2(1), 185–191.
<https://doi.org/doi.org/10.60126/jgen.v2i1.359>
- Rafli, A. S., & Prawoto, B. P. (2025). ANALISIS KESTABILAN PENYEBARAN PENYAKIT MALARIA DENGAN ADANYA FAKTOR MUSIM PADA NYAMUK. *Math Unesa Jurnal Ilmiah Matematika*, 13(02), 619–628.
- Ramadhani, T., Amirullah, A., & Rahmat, R. (2021). Kajian Entomologi dalam Mendukung Pengendalian Malaria melalui Program Flying Health Care (FHC) di Kabupaten Yahukimo, Provinsi Papua. *BALABA*, 17(2), 191–204.
<https://doi.org/https://doi.org/10.22435/blb.v17i2.5303> Kajian
- Setianingsih, E., & Sulistyaningrum, E. (2025). Public Health in Practice The impact of the malaria centre program on malaria incidence in Papua Province. *Public Health in Practice*, 9(September 2024), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.puhip.2025.100625>
- Tami, M., Assa, I., Asmuruf, F., Innah, H., Ramandey, S. A. W., Dewa, I., ... Ratnasariani, W. (2025). Sosialisasi Pencegahan Malaria di SD Negeri Inpres Skouw Sae , Distrik Muara Tami, Papua. *Inovasi Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 3(1), 35–40.
<https://doi.org/https://doi.org/10.54082/ijpm.139>