

Analysis of Vulnerable and Recovered Population Dynamics in the SAHTR Model Based on Variations in the Spread and Rehabilitation Rates

Nita Anggriani¹, James U.L. Mangobi², Muhammad Isbar Pratama³, Lilis Handayani⁴, Rosauli Novalina Samosir⁵,

Department of Mathematics, Universitas Negeri Manado^{1,2,5}, Department of Mathematics,

Universitas Negeri Makassar³, Department of Public Health Sciences, Universitas Samratulangi⁴

nita_anggriani@unima.ac.id¹, jamesmangobi@unima.ac.id², isbarpratama@unm.ac.id³,

lilishandayani@unsrat.ac.id⁴, rosaulisamosir@unima.ac.id⁵

Corresponding Author: Nita Anggriani, E-mail: nita_anggriani@unima.ac.id

ABSTRACT

Drug abuse continues to be a significant public health issue, especially in developing countries such as Indonesia, with increasing prevalence among the productive age group. This study develops and analyzes a compartmental mathematical model, SAHTR (Susceptible, Addicted-Lighter, Addicted-Heavier, Treatment, Recovery), using a nonlinear system of differential equations to simulate the dynamics of drug abuse spread and recovery. The model integrates an optimal control approach to evaluate the effectiveness of two intervention strategies: anti-drug campaigns and psychological counseling. Numerical simulations were carried out using the Runge-Kutta 4th order method, focusing on the sensitivity analysis of two key parameters: the rate of social transmission (β) and rehabilitation success rate (γ_2). The results show that while the β parameter influences the initial decline of the susceptible population, its long-term impact is relatively minimal. In contrast, the γ_2 parameter significantly affects the dynamics of the recovery compartment, indicating that improving rehabilitation efficiency can substantially reduce system burden and accelerate the return of individuals to a drug-free state. These findings suggest that intervention strategies should prioritize enhancing the quality and accessibility of rehabilitation programs, including structured therapy and post-recovery support. Moreover, social influence control alone is insufficient without being complemented by preventive and community-based approaches. Overall, this study contributes to evidence-based policymaking by demonstrating the value of mathematical modeling in understanding and combating drug abuse effectively.

KEYWORDS

SAHTR model, drug abuse, optimal control, parameter sensitivity, rehabilitation

ARTICLE DOI:

<https://doi.org/10.53696/venn.v4i3.322>

A. Pendahuluan

Penyalahgunaan narkoba telah menjadi salah satu isu kesehatan masyarakat yang sangat kompleks dan terus berkembang dalam beberapa tahun terakhir, terutama di negara-negara berkembang seperti Indonesia. Berdasarkan laporan Badan Narkotika Nasional (BNN), sekitar 2,5% dari total penduduk usia produktif telah terpapar narkoba pada tahun 2022, dengan tren yang terus meningkat sejak 2018 (Badan Narkotika Nasional (BNN), 2023). Dampak yang ditimbulkan oleh penyalahgunaan narkoba sangat besar, mencakup aspek kesehatan, ekonomi, serta stabilitas sosial Masyarakat (Prasetyo D et al., 2022; Wallace et al., 2021). Oleh karena itu, penyalahgunaan narkoba menjadi salah satu isu yang mendesak untuk ditangani, terlebih bagi generasi muda yang sangat rentan terpapar.

Pemahaman dan pengendalian dinamika penyebaran narkoba memerlukan berbagai pendekatan, salah satunya adalah pendekatan matematis yang menggunakan sistem persamaan

diferensial. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai cara penyebaran narkoba dalam suatu populasi. Model matematika ini berfungsi untuk memetakan perubahan status individu dalam populasi serta memprediksi dampak intervensi kebijakan yang diterapkan dalam mengendalikan penyalahgunaan narkoba. Dengan menggunakan model ini, kita dapat mengevaluasi efektivitas berbagai kebijakan pencegahan dan rehabilitasi, serta mengidentifikasi titik-titik intervensi yang paling efektif dalam mengurangi prevalensi penyalahgunaan narkoba. Selain itu, pendekatan ini memungkinkan analisis sensitivitas terhadap parameter-parameter tertentu, seperti laju penyebaran sosial dan keberhasilan rehabilitasi, yang memberikan wawasan lebih mendalam tentang faktor-faktor yang mempengaruhi dinamika populasi. (Maria Hernandez & Michael Smith., 2015)

Model kompartemen SAHTR (*Susceptible, Addicted-Lighter, Addicted-Heavier, Treatment, Recovery*) adalah model yang dikembangkan oleh Anggriani (2021) untuk menggambarkan transisi individu dalam populasi yang terlibat dalam penyalahgunaan narkoba. Model ini membagi populasi menjadi lima kompartemen utama: Susceptible (S), individu yang rentan terhadap narkoba; Addicted-Lighter (A), individu yang menggunakan narkoba pada tingkat ringan; Addicted-Heavier (H), individu dengan kecanduan berat; Treatment (T), individu yang menjalani perawatan untuk mengatasi kecanduan; dan Recovery (R), individu yang berhasil pulih dari kecanduan narkoba. Model ini memungkinkan pemetaan perubahan status individu seiring waktu dan analisis dinamika penyebaran narkoba, yang sangat penting dalam merancang kebijakan intervensi yang efektif (Nita Anggriani, 2021).

(Li & Chen, 2019) menyoroti pentingnya sensitivitas parameter dalam merancang strategi intervensi jangka panjang, sementara Omame et al. (2021) menekankan bahwa pengendalian penyalahgunaan narkoba harus bersifat multidimensi, yang mencakup edukasi masyarakat dan layanan psikososial (Lemes et al., 2017; Li & Chen, 2019). Meskipun terdapat sejumlah penelitian yang membahas berbagai faktor yang memengaruhi dinamika penyalahgunaan narkoba, masih terbatas studi yang secara eksplisit mengkaji pengaruh simultan antara laju penyebaran sosial (β) dan keberhasilan rehabilitasi (γ_2) terhadap dinamika populasi rentan dan pemulihan. Hal ini ditegaskan oleh (Mamo et al., 2024) yang menyatakan bahwa meskipun ada banyak model yang mempertimbangkan salah satu dari kedua faktor tersebut, pengaruh simultan keduanya terhadap populasi rentan dan pemulihan masih jarang dijumpai dalam literatur yang ada

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika populasi rentan dan pulih dalam konteks model SAHTR, dengan berfokus pada variasi dua faktor utama: laju penyebaran narkoba (β) dan keberhasilan rehabilitasi (γ_2). Laju penyebaran narkoba (β) menggambarkan seberapa cepat individu yang rentan beralih menjadi pengguna narkoba, baik yang ringan maupun berat, yang dipengaruhi oleh faktor sosial seperti teman sebaya, media, dan lingkungan. Keberhasilan rehabilitasi (γ_2) mengukur efektivitas program rehabilitasi dalam memulihkan individu yang telah terjerat narkoba, dengan melibatkan intervensi medis dan psikologis yang bertujuan mengurangi ketergantungan narkoba dan mencegah individu kembali terjerat.

Penelitian oleh (Nita Anggriani et al., 2021) menunjukkan bahwa kombinasi antara kampanye edukasi (α_1) dan penguatan konseling psikologis (α_2) dapat secara signifikan mengurangi jumlah pengguna berat, terutama jika diterapkan secara konsisten dalam jangka panjang. Model SAHTR yang digunakan dalam penelitian ini mengintegrasikan prinsip kontrol optimal untuk meminimalkan jumlah pengguna aktif melalui intervensi kebijakan yang lebih efektif. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi bagaimana β dan γ_2 mempengaruhi populasi rentan dan pulih, serta untuk menganalisis pengaruh perubahan kedua parameter tersebut terhadap dinamika populasi narkoba.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan kebijakan berbasis data dalam pencegahan dan rehabilitasi penyalahgunaan narkoba.

Dengan mensimulasikan model SAHTR berbasis kontrol optimal, penelitian ini berfokus pada analisis sensitivitas parameter β dan γ_2 , serta mengevaluasi dampak perubahan parameter terhadap dinamika kompartemen populasi yang rentan dan pulih. Temuan dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar yang kuat bagi penyusunan kebijakan yang lebih efektif dalam mengendalikan penyalahgunaan narkoba dan meningkatkan keberhasilan program rehabilitasi.

B. Metodologi

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika populasi rentan dan populasi yang pulih dalam konteks model SAHTR, yang berfokus pada variasi dua faktor utama yaitu tingkat penyebaran narkoba β dan keberhasilan rehabilitasi γ_2 . Tingkat penyebaran narkoba dalam penelitian ini merujuk pada laju dimana individu yang rentan terhadap narkoba (belum terpapar) beralih menjadi pengguna narkoba, baik dalam kategori pengguna ringan (*Addicted – Lighter*) maupun pengguna berat (*Addicted – Heavier*). Laju penyebaran ini dipengaruhi oleh berbagai faktor sosial, seperti pengaruh teman sebaya, media, serta faktor lingkungan yang dapat mempercepat atau memperlambat proses terpaparnya individu terhadap narkoba. Sementara itu, keberhasilan rehabilitasi dalam penelitian ini didefinisikan sebagai tingkat efektivitas program rehabilitasi yang bertujuan untuk memulihkan individu yang telah terjerat kecanduan narkoba. Program rehabilitasi ini mencakup intervensi medis dan psikologis yang dirancang untuk mengurangi ketergantungan narkoba dan mencegah individu untuk kembali, dengan mengukur seberapa banyak individu yang berhasil pulih dan kembali ke kehidupan normal.

Penelitian ini menggunakan pendekatan matematika terapan melalui sistem persamaan diferensial nonlinier untuk menggambarkan perubahan status individu dalam populasi yang terlibat dalam penyalahgunaan narkoba. Model SAHTR membagi populasi ke dalam lima kompartemen utama: *Susceptible* (S), *Lighter Users* (A), *Heavy Users* (H), *Treatment* (T), dan *Recovery* (R). Sistem persamaan diferensial yang digunakan untuk menggambarkan dinamika transisi antar kompartemen ini dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu laju penyebaran narkoba (β) dan efektivitas rehabilitasi (γ_2). Persamaan diferensial untuk menggambarkan dinamika transisi antar kompartemen adalah sebagai berikut (Nita Anggriani, 2021):

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} &= \Lambda - \sigma(1 - \alpha_1)S(A + H) - \phi S + \gamma_2 \alpha_2 R \\ \frac{dA(t)}{dt} &= \sigma(1 - \alpha_1)S(A + H) + \gamma_2(1 - \alpha_2)R - (\theta + \phi + \omega)A \\ \frac{dH(t)}{dt} &= \theta A - (\phi + \vartheta + \rho)H + \gamma_1 T \\ \frac{dT(t)}{dt} &= \rho H + \omega A - (\phi + \gamma_1 + \epsilon)T \\ \frac{dR(t)}{dt} &= \epsilon T - (\gamma_2)R \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

di mana:

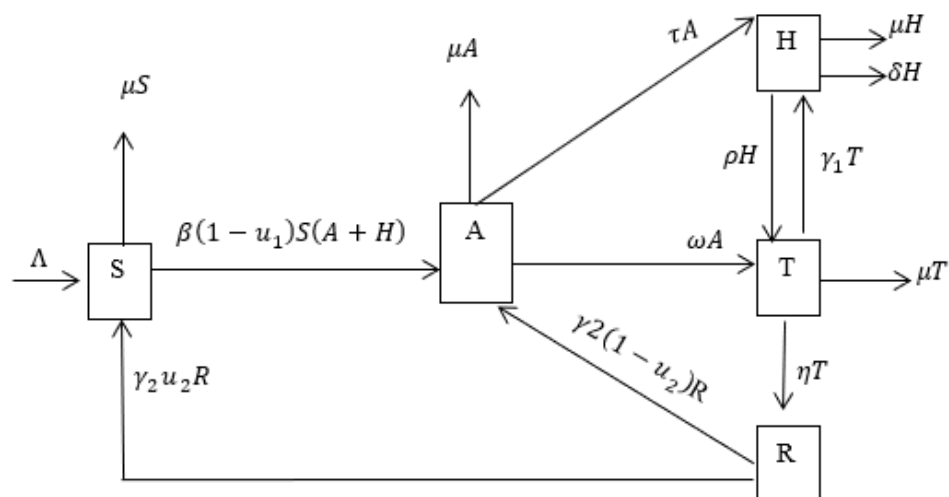
- Λ adalah laju penetapan individu yang terekrutkan ke dalam kelas rentan.
- α_1 adalah proporsi dampak dari kampanye anti-narkoba
- α_2 adalah proporsi dampak dari penguatan psikologis melalui konseling.
- γ_1, γ_2 adalah laju perpindahan antara kompartemen.

- $\theta, \varphi, \vartheta, \rho, \epsilon, \omega$ adalah berbagai laju perpindahan antar kompartemen yang mengatur dinamika perubahan status individu dalam model.

Simulasi numerik dilakukan dengan penerapan metode Runge-Kutta orde 4, yang digunakan dalam pemecahan sistem persamaan diferensial ini. Fokus simulasi diarahkan pada analisis sensitivitas terhadap dua parameter kunci, yaitu β (penyebaran narkoba) dan γ_2 (keberhasilan rehabilitasi). Hasil simulasi divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk mengevaluasi dampak perubahan nilai parameter terhadap dinamika populasi di masing-masing kompartemen menggunakan aplikasi Matlab R2025a.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Pada bagian ini, hasil simulasi numerik yang dilakukan berdasarkan model SAHTR bertujuan untuk menganalisis dinamika populasi rentan dan pulih dalam konteks variasi dua parameter utama: tingkat penyebaran narkoba (β) dan keberhasilan rehabilitasi (γ_2). Populasi rentan merujuk pada individu yang belum terpapar narkoba tetapi memiliki risiko tinggi untuk terlibat dalam penyalahgunaan narkoba akibat faktor sosial, psikologis, atau lingkungan. Sementara itu, populasi yang pulih adalah individu yang telah menjalani proses rehabilitasi dan berhasil keluar dari kecanduan narkoba, baik melalui perawatan medis maupun psikologis.



Gambar 1. Skema Model SAHTR Penyebaran Penyalahgunaan Narkoba

Skema pemodelan penyebaran penyalahgunaan narkoba menggunakan model SAHTR ini menggambarkan hubungan antar lima kompartemen dalam populasi yang terlibat dalam penyalahgunaan narkoba. Dinamika transisi antar kompartemen ini dipengaruhi oleh faktor penyebaran narkoba dan intervensi rehabilitasi, yang tercermin dalam parameter-parameter yang digunakan dalam simulasi numerik (Lenhart & Workman, 2007).

Tabel 1. Nilai Parameter (Nita Anggriani, 2021)

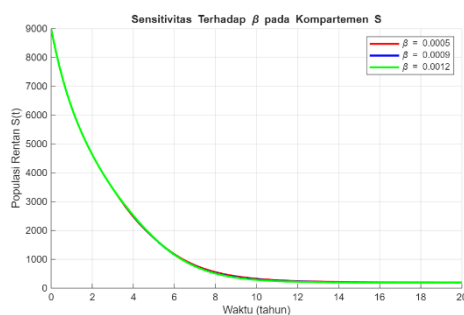
Parameter	Simbol	Nilai	Keterangan
Laju masuk ke kelas rentan	Λ	100	Jumlah individu baru yang terekrut ke dalam populasi rentan setiap tahun
Laju individu dalam populasi Narkoba tingkat ringan menuju kecanduan berat	τ	0,05	Persentase individu pengguna ringan yang berkembang menjadi pengguna berat
Laju populasi penyalahgunaan Narkoba tingkatan ringan ke treatment	ω	0,65	Proporsi individu pengguna ringan yang mengakses layanan perawatan
Laju populasi penyalahgunaan Narkoba dari treatment ke sembuh	η	0,8	Efektivitas program rehabilitasi dalam menyembuhkan individu
Laju populasi penyalahgunaan Narkoba dari tingkat pengobatan ke tingkat berat	γ_1	0,07	Proporsi individu yang kembali ke kecanduan berat setelah menjalani perawatan
Laju populasi penyalahgunaan dari tingkat berat ke treatment	ρ	0,5	Proporsi pengguna berat yang menjalani program perawatan
Tingkat kematian alami dalam populasi	μ	0,5	Probabilitas kematian alami pada semua kompartemen populasi
Tingkat kematian yang disebabkan oleh komplikasi atau overdosis pada pengguna narkoba berat	δ	0,2	Persentase kematian akibat komplikasi atau overdosis pada pengguna berat

Tabel 1 menyajikan nilai-nilai parameter yang digunakan dalam simulasi untuk mengontrol dinamika peralihan individu antar kompartemen. Sesuai dengan data kesehatan terkini, prevalensi penyalahgunaan narkoba di negara maju maupun berkembang masih menjadi ancaman serius. Penelitian ini menggunakan strategi intervensi ketergantungan waktu, yang memungkinkan pengurangan penggunaan narkoba yang efektif dalam waktu 15 tahun (Mushayabasa & Tapedzesa, 2015). Bobot yang digunakan untuk simulasi numerik (Kanyaa et al., 2018; Lucas & Dmitry Kuznetsov, 2019; Mushayabasa & Tapedzesa, 2015) adalah $C_1 = 10$, $C_2 = 75$, $C_3 = 55$, $C_4 = 50$ sedangkan syarat awal dari simulasi numerik adalah sebagai berikut: $S(0) = 9.000$ individu, $A(0) = 4.000$ individu, $H(0) = 500$ individu, $T(0) = 2.000$ individu, $R(0) = 1.000$ individu, dan dipilih waktu $t_f = 15$ tahun. Pendekatan numerik yang diterapkan dalam penelitian ini adalah metode forward-backward sweep, dengan interval waktu mulai dari $t_0 = 0$ hingga $t_f = 20$ tahun. Fungsi kontrol yang digunakan adalah $\alpha_i = (\alpha_{i1}, \dots, \alpha_{in})$ diperbaharui setiap iterasi menggunakan metode Runge-Kutta orde 4. Nilai α_i diperbaruhi dnegan menggunakan formula $\alpha = \frac{(\alpha_{lama} + \alpha_{baru})}{2}$ (Nita Anggriani, 2021; Toaha & Azis, 2018).

Hasil simulasi numerik dilakukan untuk memodelkan dinamika perubahan dalam populasi dan mengevaluasi efektivitas kebijakan yang diterapkan. Selanjutnya, analisis sensitivitas terhadap parameter β dan γ_2 dilakukan untuk mengamati pengaruhnya terhadap populasi rentan $S(t)$ dan pemulihan $R(t)$. Penyalahgunaan narkoba merupakan permasalahan kesehatan masyarakat yang mendesak di berbagai negara, termasuk Indonesia. Berdasarkan laporan Badan Narkotika Nasional (BNN) dan United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC), prevalensi penyalahgunaan narkoba meningkat secara signifikan, terutama di kalangan usia produktif. Di Indonesia, data terkini

menunjukkan bahwa 2,3% hingga 2,5% populasi usia produktif pernah terpapar narkoba, dengan tren peningkatan pada kelompok usia muda (Gecio Viana (Pewarta), 2024; United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC), 2020). Oleh karena itu, pendekatan berbasis model matematis sangat diperlukan untuk memetakan pola penyebaran dan merumuskan strategi penanggulangan yang efektif.

Salah satu kompartemen penting dalam model SAHTR adalah kelompok populasi rentan $S(t)$, yakni individu yang belum terlibat dalam penyalahgunaan narkoba tetapi memiliki risiko tinggi akibat faktor lingkungan, sosial, atau psikologis. Populasi rentan ini mencakup individu yang terpengaruh oleh faktor-faktor eksternal seperti pengaruh teman sebaya, tekanan sosial, lingkungan keluarga yang tidak stabil, atau keterpaparan terhadap situasi yang memfasilitasi penggunaan narkoba. Oleh karena itu, meskipun mereka belum terlibat langsung, individu dalam kompartemen ini berisiko tinggi untuk beralih ke dalam kategori pengguna narkoba jika kondisi yang ada tidak diperbaiki. Untuk memahami sejauh mana pengaruh parameter terhadap dinamika populasi ini, dilakukan analisis sensitivitas terhadap parameter β , yang merepresentasikan laju penularan sosial dari pengguna aktif ke individu rentan. Dalam simulasi numerik, digunakan tiga nilai parameter β (Alice Smith, 2021; Nita Anggriani, 2021; Zaman et al., 2017), yaitu 0,005; 0,0009; 0,0012. Hasil simulasi disajikan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Sensitivitas Terhadap β pada kompartemen S

Gambar 2 memperlihatkan perubahan jumlah populasi rentan $S(t)$ terhadap waktu selama 15 tahun untuk masing-masing variasi parameter β . Semakin tinggi nilai β , semakin cepat penurunan jumlah individu dalam kompartemen rentan. Garis hijau ($\beta = 0,0012$) menunjukkan penurunan yang paling tajam, diikuti oleh garis biru ($\beta = 0,0009$), dan garis merah ($\beta = 0,0005$) yang memiliki laju penurunan paling lambat. Grafik ini menunjukkan bahwa populasi rentan berkurang dengan sangat cepat dalam waktu yang relatif singkat, terlepas dari variasi nilai β .

Kurva hijau, yang mewakili ($\beta = 0,0012$), menunjukkan penurunan yang sedikit lebih cepat dibandingkan dengan kurva biru ($\beta = 0,0009$) dan kurva merah ($\beta = 0,0005$) yang mengindikasikan bahwa semakin tinggi nilai β , semakin cepat populasi rentan berkurang. Ketiga kurva menunjukkan pola penurunan eksponensial dan mulai konvergen pada tahun ke-10, mendekati nol. Meskipun demikian, perbedaan antara ketiga kurva ini tidak terlalu besar, yang menunjukkan bahwa perubahan dalam nilai β dalam kisaran ini tidak memiliki dampak signifikan terhadap tingkat penurunan populasi rentan dalam jangka panjang. Semua kurva menunjukkan pola penurunan yang sangat mirip, yang berarti bahwa meskipun nilai β bervariasi, kecepatan penurunan populasi rentan relatif serupa.

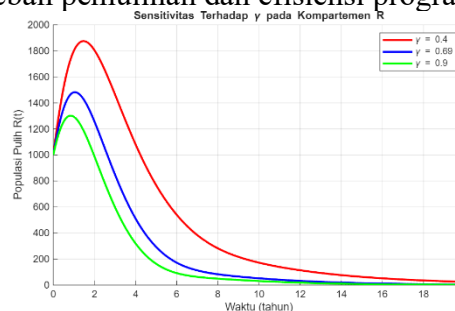
Fenomena ini menunjukkan bahwa kompartemen S cenderung tidak sensitif terhadap fluktuasi β dalam kisaran nilai tersebut, kemungkinan karena dominasi parameter lain seperti τ (laju perubahan ke pengguna aktif) atau ω (kontribusi sosial dalam penularan). Hal ini menyiratkan bahwa peningkatan atau penurunan laju penularan sosial dalam batas tertentu tidak secara drastis mengubah tren penurunan populasi rentan, terutama pada fase awal epidemi. Analisis ini juga menunjukkan

bahwa populasi rentan berperan penting dalam mengatur laju penyebaran narkoba, terutama pada tahap awal penyebaran. Meskipun variasi dalam β memberikan dampak terhadap populasi rentan pada awal periode, pengaruh tersebut cenderung berkurang dalam jangka panjang. Hal ini menunjukkan bahwa populasi rentan sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan sosial, yang memerlukan pendekatan yang lebih terintegrasi dalam pencegahan penyalahgunaan narkoba.

Implikasi dari temuan ini adalah bahwa intervensi kebijakan yang hanya berfokus pada pengurangan pengaruh sosial—misalnya melalui kampanye anti-narkoba yang bersifat umum—tidak akan cukup efektif jika tidak didukung oleh pendekatan preventif lain, seperti konseling individu, peningkatan ketahanan sosial, dan intervensi berbasis keluarga atau komunitas. Hal ini sejalan dengan temuan (Mushayabasa & Tapedzesa, 2015), yang menyatakan bahwa pengendalian penyalahgunaan narkoba memerlukan strategi multidimensional dan integratif untuk mencapai hasil yang optimal. Temuan ini mengindikasikan bahwa parameter β berperan penting dalam mengatur laju perubahan status individu dari rentan menjadi pengguna narkoba, tetapi dalam kisaran nilai β yang digunakan dalam simulasi ini, perubahan nilai β tidak memberikan perbedaan besar dalam kecepatan penurunan populasi rentan, khususnya setelah periode awal.

Upaya mengkaji efektivitas program rehabilitasi dalam model dinamika penyalahgunaan narkoba, dilakukan analisis sensitivitas terhadap parameter γ_2 , yang merepresentasikan tingkat keberhasilan pemulihan individu yang menjalani proses rehabilitasi. Keberhasilan rehabilitasi didefinisikan sebagai tingkat efektivitas program rehabilitasi yang bertujuan untuk memulihkan individu yang telah terjerat kecanduan narkoba. Program rehabilitasi ini mencakup intervensi medis dan psikologis yang dirancang untuk mengurangi ketergantungan narkoba dan mencegah individu untuk kembali terjerat kecanduan, dengan mengukur seberapa banyak individu yang berhasil pulih dan kembali ke kehidupan normal tanpa ketergantungan.

Melalui variasi nilai γ_2 , dapat diamati bagaimana perubahan tingkat keberhasilan rehabilitasi memengaruhi jumlah populasi dalam kompartemen $R(t)$, yaitu populasi individu yang sedang dalam proses pemulihan. Hasil simulasi ini memberikan wawasan mengenai bagaimana performa sistem rehabilitasi berdampak terhadap beban pemulihan dan efisiensi program yang diterapkan.



Gambar 3. Sensitivitas Terhadap γ pada kompartemen R

Gambar 3 menunjukkan sensitivitas terhadap parameter γ_2 terhadap dinamika populasi pulih dari penyalahgunaan narkoba, $R(t)$. Tiga nilai digunakan dalam simulasi (Lemes et al., 2017; Nita Anggriani, 2021), yaitu $\gamma_2 = 0,4; 0,69; 0,9$ yang mencerminkan skenario keberhasilan pemulihan rendah, sedang, dan tinggi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai γ_2 yang lebih rendah menghasilkan populasi pulih yang lebih tinggi dalam jangka pendek, seperti tampak pada garis merah ($\gamma_2 = 0,4$) yang mencapai puncak tertinggi sekitar tahun ke-2.

Namun, meskipun populasi pulih awalnya lebih tinggi pada γ_2 rendah, laju penurunannya juga lebih lambat dibanding skenario dengan nilai γ_2 lebih besar. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya efisiensi pemulihan yang secara langsung menurunkan kebutuhan terhadap jumlah individu dalam

kompartemen R . Dengan kata lain, semakin tinggi nilai γ_2 , semakin cepat individu keluar dari status pemulihan dan kembali ke populasi sehat, sehingga jumlah $R(t)$ yang tercatat akan lebih kecil.

Dengan demikian, parameter γ_2 merupakan faktor yang sensitif dan sangat penting dalam menentukan beban pada sistem rehabilitasi. Strategi peningkatan efisiensi rehabilitasi—melalui penyediaan layanan kesehatan mental, terapi terstruktur, dan dukungan pasca-rehabilitasi—dapat mempercepat proses pemulihan individu serta secara signifikan mengurangi tekanan terhadap kapasitas sistem rehabilitasi. Analisis ini juga menunjukkan bahwa meskipun peningkatan nilai γ_2 menyebabkan penurunan nilai maksimum $R(t)$, kondisi tersebut menandakan keberhasilan program rehabilitasi yang berjalan lebih efisien dan memberikan dampak positif dalam jangka panjang. Temuan ini konsisten dengan literatur yang menekankan pentingnya optimalisasi program rehabilitasi sebagai upaya utama dalam mengurangi tekanan sistemik terhadap kompartemen pemulihan (Li & Chen, 2019; Zaman et al., 2017).

Hasil sensitivitas memperkuat pentingnya pemilihan parameter yang tepat dalam strategi pengendalian. Parameter γ_2 terbukti lebih sensitif dan strategis untuk dioptimalkan karena secara langsung berhubungan dengan efisiensi pemulihan. Sebaliknya, parameter β relatif kurang sensitif dalam kisaran nilai yang digunakan, sehingga pengendalian terhadap pengaruh sosial memerlukan pendekatan komprehensif yang mencakup kampanye edukasi dan intervensi komunitas secara bersamaan. Oleh karena itu, integrasi strategi berbasis data parameter paling sensitif dapat meningkatkan efisiensi kebijakan dan mengurangi pemborosan sumber daya (Lenhart & Workman, 2007; Smith Jr et al., 2020).

D. Kesimpulan

Kesimpulan: Penyalahgunaan narkoba merupakan masalah kesehatan masyarakat yang signifikan, dengan dampak luas pada aspek kesehatan, ekonomi, dan stabilitas sosial. Penelitian ini menggunakan model SAHTR untuk menganalisis dinamika populasi rentan dan pulih, yang berfokus pada dua faktor utama: tingkat penyebaran narkoba (β) dan keberhasilan rehabilitasi (γ_2). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua faktor ini memengaruhi secara signifikan dinamika populasi rentan dan pulih. Simulasi numerik yang dilakukan dengan model SAHTR menunjukkan bahwa parameter β , yang merepresentasikan laju penyebaran narkoba, memengaruhi populasi rentan dengan mempercepat transisi individu dari status rentan menjadi pengguna narkoba. Meskipun variasi dalam nilai β mempercepat penurunan populasi rentan dalam jangka pendek, perubahan nilai β dalam kisaran yang digunakan tidak memberikan dampak besar pada tingkat penurunan populasi rentan dalam jangka panjang, setelah fase awal.

Sebaliknya, parameter γ_2 , yang berkaitan dengan keberhasilan rehabilitasi, terbukti lebih sensitif dan memiliki dampak lebih besar terhadap populasi yang pulih. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan γ_2 secara signifikan mempercepat pemulihan individu yang terjerat kecanduan narkoba, dengan menurunkan beban pada sistem rehabilitasi. Peningkatan efisiensi rehabilitasi, seperti yang tercermin dalam nilai γ_2 yang lebih tinggi, memungkinkan individu untuk lebih cepat keluar dari proses perawatan dan kembali ke kehidupan normal tanpa ketergantungan. Temuan ini mengindikasikan bahwa meskipun laju penyebaran narkoba (β) berperan penting dalam transisi individu dari rentan menjadi pengguna narkoba, keberhasilan rehabilitasi (γ_2) lebih strategis untuk dioptimalkan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, kebijakan pengendalian penyalahgunaan narkoba seharusnya lebih mengutamakan peningkatan efisiensi program rehabilitasi melalui layanan medis dan psikologis yang lebih optimal, sebagai bagian dari strategi pengendalian yang holistik dan menyeluruh.

Saran: Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar kebijakan pengendalian penyalahgunaan narkoba tidak hanya fokus pada upaya pengurangan pengaruh sosial melalui kampanye anti-narkoba, tetapi juga memperkuat pendekatan rehabilitasi yang lebih efisien. Program rehabilitasi yang berbasis pada efisiensi pemulihan individu perlu diperkuat, termasuk melalui penyediaan layanan kesehatan mental dan dukungan pasca-rehabilitasi yang memadai. Selain itu, kebijakan yang mencakup pendekatan multidimensi, yang melibatkan masyarakat, keluarga, dan intervensi berbasis komunitas, harus diterapkan secara lebih komprehensif untuk menghasilkan dampak yang lebih optimal dalam jangka panjang.

Daftar Pustaka

- Alice Smith. (2021). Continuity and Its Applications in Mathematical Modeling. *Applied Mathematics Review*, 32(4), 200–215.
- Badan Narkotika Nasional (BNN). (2023). *Laporan Survei Nasional Penyalahgunaan Narkoba Tahun 2022*. [https://proplusgpt.site/c/686a0311-7c64-800c-8d5b-41348b7a24b2#:~:text=Indonesia.%0ALink%3A-,Badan%20Narkotika%20Nasional%20\(BNN\),-Prasetyo%2C%20D.%2C%20Sari](https://proplusgpt.site/c/686a0311-7c64-800c-8d5b-41348b7a24b2#:~:text=Indonesia.%0ALink%3A-,Badan%20Narkotika%20Nasional%20(BNN),-Prasetyo%2C%20D.%2C%20Sari)
- Gecio Viana (Pewarta). (2024, August 20). *BNN: Prevalensi penyalahgunaan narkoba papar 3,3 juta jiwa pada 2023*. ANTARA News. https://www.antaranews.com/berita/4274191/bnn-prevalensi-penyalahgunaan-narkoba-papar-33-juta-jiwa-pada-2023?utm_source=chatgpt.com
- Kanyaa, J. K., Osman, S., & Wainaina, M. (2018). Mathematical modelling of substance abuse by commercial drivers. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 14(9), 1149–1165.
- Lemes, A. G., do Nascimento, V. F., da Rocha, E. M., de Moura, A. A. M., Luis, M. A. V., & de Macedo, J. Q. (2017). Integrative Community Therapy as a strategy for coping with drug among inmates in therapeutic communities: documentary research. *SMAD, Revista Electrónica En Salud Mental, Alcohol y Drogas*, 13(2), 101–108.
- Lenhart, S., & Workman, J. T. (2007). *Optimal control applied to biological models*. CRC press.
- Li, Y., S. J., & Chen, M. (2019). Sensitivity analysis of rehabilitation parameters in addiction models. *Journal of Mathematical Biology*, 78(4), 741–760.
- Lucas, Fikiri. M., & Dmitry Kuznetsov. (2019). Mathematical Modelling on the Effects of Drug Abuse to the Societies. *Department of Applied Mathematics The Nelson Mandela Africa Institute of Science and Technology Arusha*.
- Mamo, D. K., Kinyanjui, M. N., Teklu, S. W., & Hailu, G. K. (2024). Mathematical modeling and analysis of the co-dynamics of crime and drug abuse. *Scientific Reports*, 14(1), 26461. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75034-8>
- Maria Hernandez, & Michael Smith. (2015). Modeling the dynamics of drug addiction and recovery: A mathematical approach. *Journal of Mathematical Biology*, 72(4), 981–1001.

- Mushayabasa, S., & Tapedzesa, G. (2015). Modeling illicit drug use dynamics and its optimal control analysis. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2015.
- Nita Anggriani. (2021). *Analisis Kestabilan dan Kontrol Optimal pada Model Matematika Dinamika Penyebaran Penyalahgunaan Narkoba*. Universitas Hasanuddin.
- Nita Anggriani, Syamsuddin Toaha, & Kasbawati, K. (2021). Optimal control of mathematical models on the dynamics spread of drug abuse. *Jurnal Matematika, Statistika Dan Komputasi*, 17(3), 339–348.
- Oname, A., Okuonghae, D., & Akinyi, C. (2021). Analysis of a mathematical model of drug addiction with relapse and reinfection. *Mathematical Biosciences*, 336, 108620.
- Prasetyo D, Sari H, & Mulyani A. (2022). Estimasi Dampak Sosial Ekonomi dari Penyalahgunaan Narkoba di Indonesia. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Nasional*, 18(1), 45–56.
- Smith Jr, T. M., Tharakan, A., & Martin, R. K. (2020). Targeting ADAM10 in cancer and autoimmunity. *Frontiers in Immunology*, 11, 499.
- Toaha, S., & Azis, M. I. (2018). Stability and optimal harvesting of modified Leslie-Gower predator-prey model. *Journal of Physics: Conference Series*, 979(1), 012069.
- United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC). (2020). *World Drug Report 2020*.
- Wallace, B., van Roode, T., Pagan, F., Hore, D., & Pauly, B. (2021). The potential impacts of community drug checking within the overdose crisis: qualitative study exploring the perspective of prospective service users. *BMC Public Health*, 21(1), 1156.
- Zaman, G., Kang, Y. H., Cho, G., & Jung, I. H. (2017). Optimal strategy of vaccination & treatment in an SIR epidemic model. *Mathematics and Computers in Simulation*, 136, 63–77.