

ANALISIS KENDALI INDUSTRIALISASI MODEL SUMBER DAYA HUTAN DALAM MENDUKUNG SDGs EKOSISTEM DARATAN

Nilwan Andiraja

Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sultan Syarif Kasim Riau

email korespondensi: nilwanandiraja@uin-suska.ac.id

Diterima: 15-05-2026, Revisi: 21-05-2026, Diterbitkan: 15-06-2026

ABSTRAK

Hutan merupakan salah satu kekayaan di Indonesia dan di dunia yang harus dijaga kelestariannya. Penjagaan dapat dilakukan dengan berbagai upaya agar hutan tetap memiliki dan menghasilkan sumber daya. Selain itu, juga diperlukan upaya untuk menghindari ancaman-ancaman disekitarnya. Salah satu ancaman yang nyata terhadap sumber daya hutan yaitu industrialisasi. Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji model kendali matematika dalam mencegah penipisan sumber daya hutan akibat industrialisasi. Pada penelitian ini dibentuk model matematika baru dengan memodifikasi model matematika sebelumnya dengan menambahkan kendali industrialisasi oleh pemerintah, dan selanjutnya membentuk fungsi tujuan baru untuk menganalisa kelas sumber daya hutan setelah diberi kendali. Kendali optimal diperoleh dengan menggunakan *Pontryagin Principle* kemudian dilakukan simulasi numerik. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa kepadatan sumber daya hutan tidak menurun dan bahkan mengalami peningkatan walaupun terdapat penipisan sumber daya hutan akibat industrialisasi. Jadi, ketercapaian penjagaan sumber daya hutan dan target SDGs 15 (ekosistem darat) dapat dilakukan jika industrialisasi dikendalikan oleh pemerintah.

Kata kunci: Hutan, Industrialisasi, Kendali, SDGs

ABSTRACT

Forests are one of Indonesia's and the world's most valuable assets that must be preserved. Protection can be achieved through various means to ensure forests retain their resources and produce them. Furthermore, efforts are also needed to avoid threats from their surroundings. One obvious threat to forest resources is industrialization. This study aimed to examine mathematical control models for preventing forest resource depletion due to industrialization. In this study, a new mathematical model was developed by modifying the previous model by adding government industrialization controls. A new objective function was then developed to analyze the forest resource classes after they were controlled. Optimal control was obtained using the Pontryagin Principle, followed by numerical simulations. The results of the numerical simulations showed that forest resource density did not decrease and even increased despite the depletion of forest resources due to industrialization. Therefore, forest resource protection and SDGs 15 (terrestrial ecosystems) can be achieved if Industrialization is

controlled by the government.

Key words: *Control, Forests, Industrialization, SDGs*

Pendahuluan

Indonesia saat ini dikenal dunia memiliki hutan alam yang terbesar dengan populasi penduduk yang tinggi. Kekayaan hutan yang melimpah, menjadikan banyak masyarakat memenuhi kebutuhan hidup dari hutan sekitar. Hal tersebut, mengakibatkan banyaknya kawasan hutan berubah menjadi kawasan perindustrian, perumahan, maupun infrastruktur lainnya. Populasi penduduk yang tinggi selaras dengan pemenuhan kebutuhan hidup yang tinggi, sehingga terjadi pembukaan kawasan hutan dengan penebangan pohon secara besar-besaran untuk pemenuhan kebutuhan penduduk (Anggriani et al., 2018; Jang et al., 2025).

Penebangan pohon secara besar-besaran untuk keperluan kehidupan dan industri disatu sisi akan memenuhi kebutuhan hidup manusia, tapi disisi lain akan memberikan dampak yang sangat besar kepada manusia. Akibat dari aktivitas penebangan pohon di hutan secara besar telah terlihat secara nyata dan jelas di Indonesia (BNPB, 2025). Hal inilah yang menjadikan penjagaan terhadap ekosistem sumber daya hutan sangat penting dan sejalan dengan salah satu bagian dari SDGs (*Sustainable Development Goals*), yaitu SDGs 15, menjaga ekosistem darat (*life on land*).

Beberapa penelitian telah membahas tentang pentingnya menjaga vegetasi atau sumber daya hutan dan pencegahan kerusakan hutan dalam rangka mendukung SDGs 15 (ekosistem daratan). Penelitian sebelumnya mengkaji pengaruh tingkat perubahan iklim terhadap kerusakan ekosistem yang mempengaruhi sumber daya (vegetasi), dan pencegahan kerusakan seperti penyediaan *roadmap* pola ekosistem dan pengembangan *early warning* untuk mencegah kerusakan vegetasi, namun tidak menyatakan adanya kebutuhan partisipasi pemerintah dalam penyediaan, pelaksanaan dan kesuksesan penerapan *roadmap* beserta *early warning* (Bastiaansen et al., 2020; Jamal et al., 2025; Liu et al., 2025; Sarun, 2026). Penelitian lain dilakukan untuk menganalisa pentingnya penjagaan hutan, bukan hanya menjaga sumber dayanya saja tetapi juga faktor lain, dalam mendukung SDGs (Ma et al., 2022). Penelitian tersebut juga tidak meneliti peran pemerintah dalam menjaga hutan guna ketercapaian SDGs 15. Selain itu, penelitian-penelitian tersebut juga belum mengkaji tentang efek industrialisasi dalam kerusakan hutan.

Penelitian yang dilakukan Bhushan dan Sen (2025) tentang hubungan penurunan kemampuan sumber daya hutan dengan perkembangan industri atau

penambahan populasi, menunjukkan adanya keterkaitan antara populasi dan kondisi sumber daya hutan. Penelitian ini juga membahas peran pemerintah dalam bentuk kebijakan untuk menjaga hutan, tapi tidak membahas efek industrialisasi terhadap kondisi hutan. Penelitian Ezeorah dan Ekaka-A (2022) serta Jatav et al. (2025) dilakukan untuk mengetahui pengaruh populasi dan industrialisasi terhadap sumber daya hutan, tapi tidak mengkaji tentang upaya untuk menjaga populasi dan industrialisasi. Penelitian lain, dilakukan tentang model matematika dari pertumbuhan populasi yang mempengaruhi sumber daya hutan, tetapi tidak mengkaji efek industrialisasi terhadap kondisi sumber daya hutan serta peran pemerintah dalam pengendalian populasi (Jha & Misra, 2025; Ngoh et al., 2025).

Penelitian lain dilakukan untuk mengetahui pengaruh populasi manusia dan efek industrialisasi terhadap penurunan kemampuan sumber daya hutan akibat kerusakan dari vegetasi hutan (Ramdhani, 2025). Namun, penelitian tersebut tidak mengkaji upaya pengendalian untuk mencegah penurunan sumber daya hutan. Penelitian penerapan model matematika dalam menjaga kondisi hutan melalui kendali aktifitas manusia disekitar hutan menunjukkan bahwa pengendalian aktifitas manusia dilakukan untuk memperbaiki vegetasi hutan (Hou et al., 2025; Hou et al., 2025), namun tidak mengkaji tentang efek industrialisasi dan peran pemerintah dalam pencegahan kerusakan sumber daya hutan.

Salah satu upaya yang penting dan diharapkan memberikan dampak langsung adalah peran pemerintah dalam menjaga kelestarian area dan sumber daya hutan (Suparto et al., 2025). Karena pemerintah dengan kuasa, besarnya sumber daya, dan kebijakannya (Lyons-White et al., 2025) dapat memberikan kendali dalam menjaga kondisi biomasa hutan dari berbagai upaya kerusakan hutan seperti memberikan batas aman daerah hutan dari kegiatan manusia (Youlistia et al., 2025), melakukan patroli di area hutan, mencegah *illegal logging*, penyuluhan kepada masyarakat tentang pentingnya fungsi hutan untuk lingkungan, rehabilitasi hutan, dan kerjasama lintas instansi (Ahmadi & Rahman, 2023; Amir et al., 2022), termasuk kerjasama dengan tokoh adat (Darmawan & Sarkawi, 2025; Wula et al., 2024). Selain itu, dilakukan juga penelitian tentang hutan di Kalimantan dengan penerapan konservasi yang bukan hanya menjaga hutan tapi juga mendukung pencapaian SDGs 15 (Hiratsuka et al., 2019).

Pembahasan di atas menunjukkan bahwa menjaga kondisi sumber daya hutan sangat penting karena akan mendukung keberlanjutan kehidupan manusia. Penjagaan terhadap hutan tidak hanya menjadi tanggung jawab masyarakat, tapi juga

tanggung jawab besar dari pemerintah. Menjaga hutan dari kerusakan termasuk salah satu target SDGs 15. Pemerintah dengan kebijakan dan kekuasaannya diharapkan mampu mencegah penurunan sumber daya hutan, salah satunya akibat dari industrialisasi. Penelitian ini membahas tentang peran pemerintah dalam menjaga vegetasi hutan dari kerusakan dengan kendali pemerintah terhadap industrialisasi. Penelitian dilakukan dengan memodifikasi penelitian terdahulu oleh Ramdhani (2025), melalui pembentukan model matematika baru dengan menambahkan kendali yaitu pemerintah. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan atau saran dalam mengendalikan kerusakan hutan dan menjaga sumber daya hutan, sebagai upaya pencapaian target SDGs 15, yaitu menjaga ekosistem darat (*life on land*).

Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan kuantitatif, melalui perancangan sistem dinamik baru dan pembentukan fungsi tujuan baru, serta penambahan kendali peran pemerintah dalam upaya menjaga vegetasi hutan. Sistem dinamik baru ini terbentuk dari pengembangan dan modifikasi model matematika terdahulu dari Ramdhani (2025) dalam bentuk sistem persamaan berikut.

$$\begin{cases} \dot{B}(t) = s \left(1 - \frac{B(t)}{L}\right) B(t) - s_0 B(t) - \beta_2 N(t) B(t) - s_1 I(t) B(t) - \beta_3 B(t)^2 I(t) \\ \dot{N}(t) = r \left(1 - \frac{N(t)}{k}\right) N(t) - r_0 N(t) + \beta_1 N(t) B(t) + \alpha_1 r_1 B(t)^2 N(t) + \alpha N(t) I(t) \\ \dot{P}(t) = \lambda N(t) - \lambda_0 P(t) - \theta I(t) \\ \dot{I}(t) = \pi \theta P(t) + \pi_1 s_1 I(t) B(t) - \theta_0 I(t) \end{cases} \quad (1)$$

Sistem persamaan (1) merupakan model matematika untuk penipisan sumber daya hutan. Ramdhani (2025) menjelaskan $B(t)$ sebagai kepadatan suatu sumber daya hutan, $N(t)$ sebagai kepadatan pada populasi penduduk, $P(t)$ sebagai kepadatan tekanan suatu populasi penduduk, dan $I(t)$ sebagai kepadatan untuk industrialisasi. Selain itu, juga diberlakukan asumsi-asumsi diantaranya: 1) persamaan logistik mempengaruhi $B(t)$ dan $N(t)$; 2) jika pertumbuhan tekanan populasi meningkat maka kepadatan penduduk meningkat; 3) peningkatan populasi penduduk dan industrialisasi mengakibatkan penipisan pada sumber daya di hutan; serta 4) nilai-nilai parameter yang digunakan pada model bernilai non negatif.

Adapun simbol-simbol pada sistem persamaan (1) dijelaskan oleh Ramdhani (2025) sebagai berikut.

- s : koefisien tingkat pertumbuhan intrinsik biomassa sumber daya hutan
- s_0 : koefisien tingkat penipisan biomassa sumber daya hutan secara alami
- s_1 : koefisien tingkat penipisan kepadatan biomassa sumber daya hutan akibat

industrialisasi

- L : daya dukung biomassa sumber daya hutan
- r_0 : koefisien tingkat kematian alami populasi
- r_1 : koefisien tingkat pertumbuhan populasi karena sumber daya biomassa hutan
- r : tingkat pertumbuhan intrinsik kepadatan populasi
- k : daya dukung kepadatan populasi
- β_1 : tingkat pertumbuhan seluruh kepadatan populasi akibat sumber daya hutan
- β_2 : koefisien tingkat kepadatan populasi dan hubungan penipisan biomassa sumber daya hutan
- β_3 : koefisien penipisan pada sumber daya hutan akibat penumpukan industrialisasi
- λ : koefisien untuk tingkat pertumbuhan tekanan populasi
- λ_0 : faktor alami dan pengurangan koefisien tingkat tekanan populasi
- θ : pengaruh meningkatnya industrialisasi yang menurunkan koefisien tekanan populasi
- θ_0 : koefisien tingkat pengendali industrialisasi secara eksternal yang dilakukan pemerintah
- $\pi_1 S_1$: tingkat tersedianya sumber daya hutan dan pertumbuhan industrialisasi
- π : tingkat tekanan populasi mengakibatkan pertumbuhan industrialisasi
- α : faktor industri mengakibatkan migrasi penduduk
- α_1 : koefisien pengaruh kepadatan populasi penduduk terhadap penipisan sumber biomassa hutan

Penelitian ini diawali dengan memodifikasi sistem persamaan (1). Modifikasi dilakukan dengan menjadikan faktor θ_0 , yaitu koefisien tingkat pengendali industrialisasi oleh pemerintah, menjadi variabel kendali sepanjang waktu t . Akibatnya, notasi θ_0 berubah menjadi $\theta_0(t)$. Kendali $\theta_0(t)$ diberikan kepada kelas $B(t)$, $N(t)$, dan $I(t)$. Hal ini dilakukan agar dapat diteliti tentang peningkatan kepadatan sumber daya hutan melalui kendali pemerintah terhadap tingkat industrialisasi. Hasil akhir langkah ini adalah model matematika baru penipisan sumber daya hutan dengan aplikasi kendali industrialisasi secara eksternal yang dilakukan pemerintah.

Langkah kedua adalah pembentukan fungsi tujuan, yang didasarkan untuk meningkatkan kepadatan sumber daya hutan $B(t)$ dengan kendali $\theta_0(t)$. Berikutnya, dengan menggunakan prinsip *Pontryagin* dibentuk fungsi Hamiltonian berdasarkan model matematika baru yang disebut persamaan *stated* dan fungsi tujuan yang telah diformulasikan. Selanjutnya dibentuk persamaan *costate* dengan menurunkan secara parsial fungsi Hamiltonian terhadap masing-masing variabel *state* $B(t)$, $N(t)$, $P(t)$ dan $I(t)$. Selain persamaan *costate*, dari fungsi Hamiltonian juga akan diturunkan secara parsial terhadap $\theta_0(t)$. Akibatnya diperoleh kendali

pemerintah yang optimal terhadap tingkat industrialisasi.

Setelah diperoleh persamaan *state*, persamaan *costate*, dan kendali optimal, selanjutnya dilakukan simulasi numerik untuk menganalisa keefektifan kendali pemerintah pada tingkat industrialisasi terhadap peningkatan kepadatan sumber daya hutan $B(t)$. Pada simulasi numerik digunakan data-data dari penelitian terdahulu (Ramdhani, 2025), agar dapat dibandingkan hasil antara sebelum penerapan kendali yang dilakukan oleh Ramdhani et al. (2025), dengan hasil setelah penerapan kendali pada penelitian ini.

Sebelum simulasi numerik dilakukan, perlu didapat solusi persamaan *state* dan *costate*. Solusi persamaan *state* (persamaan keadaan) dan persamaan *costate* secara sama, diperoleh dengan menerapkan metode *sweep forward-backward*. Persamaan *state* diselesaikan dengan menggunakan *sweep forward* sepanjang waktu t , sedangkan solusi persamaan *costate* diperoleh dari *sweep backward* sepanjang waktu t . Sebelum menggunakan langkah penentuan solusi dengan metode *sweep forward-backward*, perlu ditransformasikan persamaan *state* serta *costate* ke bentuk numerik dengan menggunakan metode Rung-Kutta orde 4. Adapun langkah-langkah proses simulasi numerik sebagai berikut (Lenhart & Workman, 2007).

- Langkah 1 : Diambil tebakan awal nilai kendali untuk $t \in [0, T_f]$.
- Langkah 2 : Digunakan nilai awal kendali pada langkah 1 untuk persamaan *state*, kemudian diselesaikan *forward-step* untuk sistem persamaan *state* menggunakan skema Runge Kutta orde 4.
- Langkah 3 : Diselesaikan *backward-step* dengan menggunakan nilai batas *costate* $\lambda(T_f) = 0$, nilai kendali, dan nilai *state* dari langkah 2. Adapun sistem persamaan *costate* diselesaikan menggunakan skema Runge Kutta orde 4.
- Langkah 4 : Diulang langkah iterasi dalam bentuk perbaikan nilai dengan memasukkan nilai *state* dan *costate* yang baru ke fungsi kendali optimal.

Simulasi dilakukan menggunakan bantuan *software* Matlab, dimulai dari waktu awal $t_0 = 0$ sampai waktu $t_f = 50$ (Ramdhani, 2025). Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk grafik hasil untuk semua kelas, yaitu kelas dengan $B(t)$, kelas $N(t)$, kelas $P(t)$, dan kelas $I(t)$. Hasil simulasi ini juga menghasilkan grafik untuk kendali optimal $\theta_0(t)$. Semua grafik hasil dianalisa dan diinterpretasi sehingga diperoleh informasi tentang pengaruh penerapan kendali tingkat industrialisasi yang dilakukan oleh pemerintah terhadap model matematika penipisan sumber daya hutan terutama pada kelas $B(t)$. Hasil yang diperoleh menunjukkan perbandingan antara

efek penggunaan kendali dan tanpa penggunaan kendali.

Hasil dan Pembahasan

Penelitian diawali dengan pembentukan model matematika baru sebagai modifikasi model matematika penipisan sumber daya hutan oleh Ramdhani (2025). Modifikasi model matematika pada sistem persamaan (1) dilakukan dengan merubah konstanta θ_0 di kelas $I(t)$ menjadi variabel kendali $\theta_0(t)$, dan menambahkan variabel kendali kepada kelas $B(t)$ dan kelas $N(t)$, sehingga diperoleh model matematika baru sebagai berikut.

$$\begin{cases} \dot{B}(t) = s \left(1 - \frac{B(t)}{L} \right) B(t) - s_0 B(t) - \beta_2 N(t) B(t) - \theta_0(t) s_1 I(t) B(t) - \theta_0(t) \beta_3 B(t)^2 I(t) \\ \dot{N}(t) = r \left(1 - \frac{N(t)}{k} \right) N(t) - r_0 N(t) + \beta_1 N(t) B(t) + \alpha_1 r_1 B(t)^2 N(t) + \theta_0(t) \alpha N(t) I(t) \\ \dot{P}(t) = \lambda N(t) - \lambda_0 P(t) - \theta I(t) \\ \dot{I}(t) = \pi \theta P(t) + \pi_1 s_1 I(t) B(t) - \theta_0(t) I(t) \end{cases} \quad (2)$$

Sistem persamaan (2) merupakan persamaan *state* untuk model matematika penipisan sumber daya hutan dengan tingkat pengendali industrialisasi yang dilakukan pemerintah. Selanjutnya dibentuk fungsi tujuan pada persamaan (3) berdasarkan kendali $\theta_0(t)$ dengan tujuan meningkatkan kemampuan sumber daya hutan.

$$J = \int_0^{T_f} (c_1 B(t) + c_2 \theta_0(t)^2) dt \quad (3)$$

dengan c_1 dan c_2 adalah nilai-nilai parameter untuk fungsi tujuan.

Langkah berikutnya adalah membentuk fungsi Hamiltonian dengan menerapkan prinsip *Pontryagin*. Persamaan (4) menunjukkan fungsi Hamiltonian yang terbentuk.

$$\begin{aligned} H = & (c_1 B(t) + c_2 \theta_0(t)^2) \\ & + \lambda_B \left(s \left(1 - \frac{B(t)}{L} \right) B(t) - s_0 B(t) - \beta_2 N(t) B(t) - \theta_0(t) s_1 I(t) B(t) - \right. \\ & \left. \theta_0(t) \beta_3 B(t)^2 I(t) \right) + \lambda_N \left(r \left(1 - \frac{N(t)}{k} \right) N(t) - r_0 N(t) + \beta_1 N(t) B(t) + \right. \\ & \left. \alpha_1 r_1 B(t)^2 N(t) - \theta_0(t) \alpha N(t) I(t) \right) + \lambda_P (\lambda N(t) - \lambda_0 P(t) - \theta I(t)) + \lambda_I (\pi \theta P(t) + \\ & \pi_1 s_1 I(t) B(t) - \theta_0(t) I(t)) \end{aligned} \quad (4)$$

Selanjutnya dibentuk sistem persamaan *costate* dengan menurunkan secara parsial Persamaan (4) terhadap $B(t)$, $N(t)$, $H(t)$, dan $I(t)$ hingga diperoleh hasil sebagai berikut.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial B(t)} = s \left(1 - \frac{B(t)}{L} \right) B(t) - s_0 B(t) - \beta_2 N(t) B(t) - \theta_0(t) s_1 I(t) B(t) - \theta_0(t) \beta_3 B(t)^2 I(t) + \lambda_N \beta_1 N(t) + 2\lambda_N \alpha_1 r_1 B(t) N(t) + \lambda_I \pi_1 s_1 I(t) \\ \frac{\partial H}{\partial N(t)} = - \left(-\lambda_B \beta_2 B(t) + \lambda_N r - \lambda_N r \frac{2N(t)}{k} - \lambda_N r_0 + \lambda_N \beta_1 B(t) + \lambda_N \alpha_1 r_1 B(t)^2 - \lambda_N \theta_0(t) \alpha I(t) + \lambda_P \lambda \right) \\ \frac{\partial H}{\partial P(t)} = -(-\lambda_P \lambda_0 + \lambda_I \pi \theta) \\ \frac{\partial H}{\partial I(t)} = -(-\lambda_B \theta_0(t) s_1 B(t) - \lambda_B \theta_0(t) \beta_3 B(t)^2 - \lambda_N \theta_0(t) \alpha N(t) - \lambda_P \theta + \lambda_I \pi_1 s_1 B(t) - \lambda_I \theta_0(t)) \end{array} \right. \quad (5)$$

Sistem persamaan (5) merupakan sistem persamaan *costate* untuk model matematika baru pada persoalan penipisan sumber daya hutan. Sistem persamaan (5) dan Sistem persamaan (2) secara bersama-sama digunakan untuk menganalisa masing-masing kelas $B(t)$, $N(t)$, $P(t)$, dan $I(t)$ setelah diberi kendali optimal.

Selanjutnya dibentuk kendali optimal dari tingkat pengendali industrialisasi secara eksternal yang dilakukan pemerintah. Kendali tersebut diperoleh dengan menurunkan secara parsial fungsi Hamiltonian pada persamaan (4) terhadap $\theta_0(t)$, dengan hasil $\frac{\partial H}{\partial \theta_0(t)} = 2c_2 \theta_0(t) - \lambda_B s_1 I(t) B(t) - \lambda_B \beta_3 B(t)^2 I(t) - \lambda_N \alpha N(t) I(t) - \lambda_I I(t) = 0$. Akibatnya dapat diperoleh kendali optimal sebagai berikut.

$$\theta_0(t) = \frac{\lambda_B (s_1 I(t) B(t) + \beta_3 B(t)^2 I(t)) + \lambda_N \alpha N(t) I(t) + \lambda_N I(t)}{2c_2} \quad (6)$$

Persamaan (6) merupakan kendali optimal dari tingkat pengendali industrialisasi secara eksternal yang dilakukan pemerintah. Kendali ini selanjutnya dianalisa keefektifannya pada model matematika baru untuk kasus penipisan sumber daya hutan. Persamaan *state* (2), Persamaan *costate* (5), serta variabel kendali pada Persamaan (6) selanjutnya digunakan dalam simulasi numerik.

Simulasi Numerik

Simulasi numerik dilakukan untuk melengkapi pembahasan dengan menggunakan nilai-nilai parameter dari Ramdhani (2025). Data parameter-parameter untuk simulasi numerik diberikan pada tabel berikut.

Tabel 1. Nilai-nilai Parameter

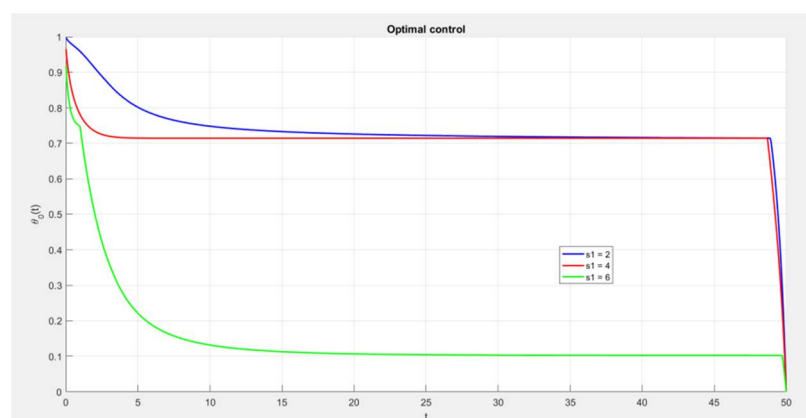
No	Simbol	Nilai
1	L	40
2	K	40
3	π	0,001
4	θ	8
5	λ	5
6	β_1	0,01
7	β_2	7
8	π_1	0,005
9	$s_0 = \theta_0 = r_1$	1

10	r	11
11	r_0	10
12	α_1	0,00001
13	λ_0	4
14	α	0,14

Simulasi numerik juga menggunakan beberapa nilai parameter yang berubah untuk proses *double* simulasi numerik. Pada simulasi pertama dilakukan untuk nilai parameter $s_1 = 2, s_1 = 4, s_1 = 6$ dengan nilai parameter $\beta_3 = 2$. Simulasi numerik kedua dilakukan untuk nilai parameter $s_1 = 2, s_1 = 4, s_1 = 6$ dengan nilai parameter $\beta_3 = 4$.

Seluruh data atau nilai parameter digunakan dalam simulasi numerik untuk memperoleh hasil analisa pengaruh kendali baru yang digunakan pada penelitian. Selain itu, penggunaan seluruh data dalam simulasi numerik juga dilakukan untuk membandingkan hasil penelitian Ramdhani (2025) dengan penelitian ini yang telah dilengkapi kendali $\theta_0(t)$ dan diberikan pada kelas $B(t)$, $N(t)$, dan $I(t)$. Simulasi ini dilakukan untuk data rentang waktu $t \in [0,50]$.

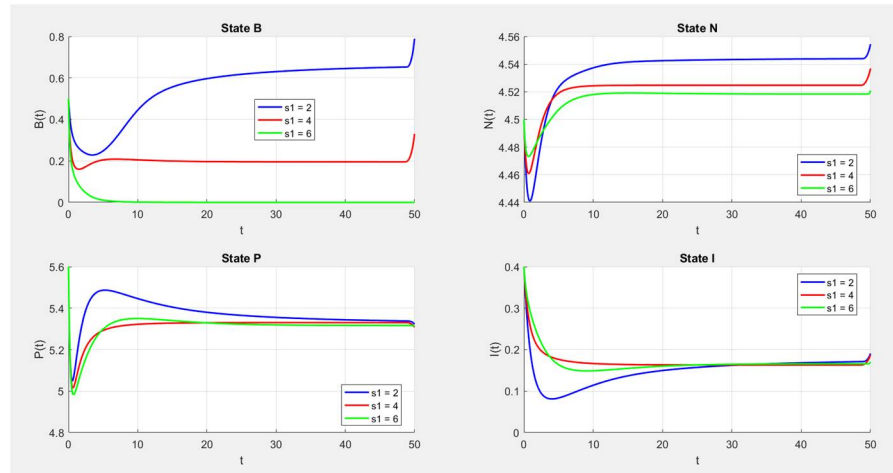
Simulasi numerik dilakukan menggunakan software Matlab, yang langkah-langkahnya mengikuti metode *sweep forward-backward*, dengan terlebih dahulu merubah Persamaan *state* (2) dan persamaan *costate* (5) menjadi *numerical form* dengan menerapkan metode Runge-Kutta orde 4. Hasil-hasil simulasi menggambarkan kondisi keempat kelas, yaitu: $B(t)$, $N(t)$, $P(t)$, dan $I(t)$ dengan analisa penggunaan kendali $\theta_0(t)$. Grafik hasil untuk kondisi penggunaan kendali diberikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik Kendali

Gambar 1 menunjukkan adanya tiga kurva kendali berdasarkan nilai s_1 . Pada grafik $s_1 = 2$ dan $s_1 = 4$ tampak penggunaan kendali industrialisasi dari pemerintah

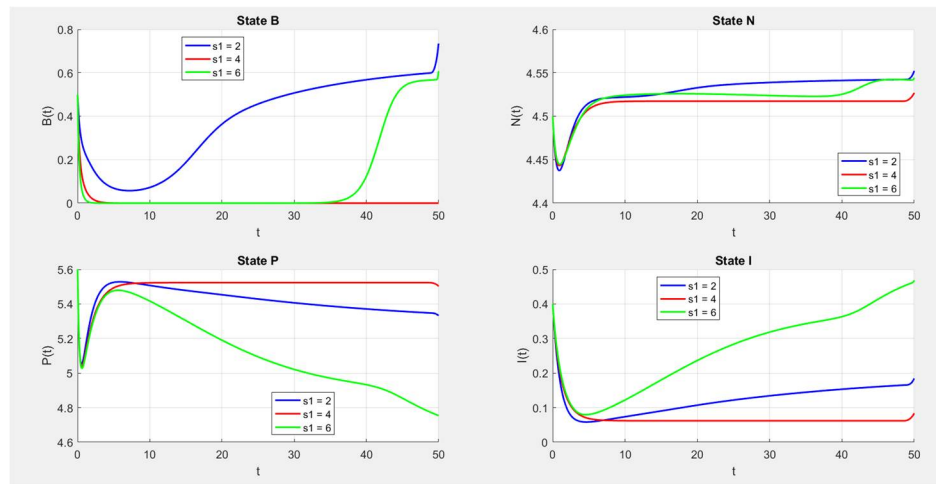
yang lebih banyak atau ketat dibandingkan penggunaan kendali pada $s_1 = 6$. Hal ini berdampak pada hasil setiap kelas $B(t)$, $N(t)$, $P(t)$, dan $I(t)$.



Gambar 2. Hasil Simulasi Pertama

Simulasi pertama dengan $\beta_3 = 2$, diperoleh empat grafik pada Gambar 2. Pada kelas $B(t)$, diketahui bahwa industrialisasi yang dikendalikan dengan ketat oleh pemerintah ($s_1 = 2$) mengakibatkan kepadatan sumber daya hutan tetap tinggi (grafik warna biru). Tetapi, jika kendali industrialisasi oleh pemerintah menurun ($s_1 = 4$ dan $s_1 = 6$), maka kepadatan sumber daya hutan juga akan menurun (grafik warna merah dan hijau).

Grafik kelas $N(t)$ menunjukkan kepadatan populasi tetap tinggi walaupun diberi kendali industrialisasi oleh pemerintah. Hasil tersebut sejalan dengan kelas $P(t)$ yang masih terlihat stabil. Kedua kelas $N(t)$ dan $P(t)$ dipengaruhi oleh rendahnya faktor penipisan sumber daya hutan akibat penumpukan industri. Hal ini tampak pada grafik $I(t)$, yang menunjukkan rendahnya faktor penipisan sumber daya hutan akibat penumpukan industri tidak mengakibatkan grafik kepadatan industrialisasi berubah secara signifikan.



Gambar 3. Hasil Smulasi Kedua

Pada simulasi kedua dilakukan perubahan nilai parameter untuk $\beta_3 = 2$ menjadi $\beta_3 = 4$. Hasil simulasi kedua untuk keempat kelas $B(t)$, $N(t)$, $P(t)$, dan $I(t)$ ditampilkan pada Gambar 3. Pada kelas $B(t)$, kenaikan β_3 sebanyak dua kali lipat cukup membuat kepadatan sumber daya hutan menurun. Tampak bahwa kendali ketat pemerintah terhadap industrialisasi mengakibatkan sumber daya hutan masih terlihat tinggi dibandingkan dengan kondisi yang lain. Pada kelas $P(t)$ terjadi perubahan yang berbeda dibandingkan simulasi pertama. Ketika nilai β_3 dan nilai s_1 tinggi, yaitu $s_1 = 6$, maka kepadatan tekanan populasi penduduk akan menurun. Hasil berbeda juga terjadi di kelas $I(t)$ yang menunjukkan ketika terjadi lonjakan nilai β_3 dan nilai $s_1 = 6$ maka kepadatan industrialisasi akan meningkat. Namun, jika kendali pemerintah masih tinggi maka kepadatan industrialisasi akan tetap rendah dan populasi akan tetap tinggi.

Berdasarkan hasil *double* simulasi yang telah dilakukan, terlihat bahwa penggunaan kendali $\theta_0(t)$, memberikan dampak yang positif terhadap kepadatan sumber daya hutan. Hasil simulasi pertama dan kedua menunjukkan jika kendali industrialisasi dilakukan pemerintah maka kepadatan sumber daya hutan akan meningkat, walaupun koefisien penipisan juga meningkat dua kali lipat. Kondisi ini berbeda dengan hasil penelitian Ramdhani (2025) yang menunjukkan bahwa kelas $B(t)$ akan selalu turun (tidak pernah naik). Hasil tersebut menunjukkan bahwa peran pemerintah dalam menjaga hutan sangat penting sehingga SDGs 15 dapat tercapai, dan sesuai dengan penelitian Ahmadi dan Rahman (2023) serta Amir et al. (2022).

Pada simulasi kedua diperoleh bahwa peningkatan dua kali lipat nilai $\beta_3 = 4$ dan nilai $s_1 = 6$ dapat menurunkan kepadatan tekanan populasi penduduk dengan

tajam. Kondisi ini sesuai dengan penelitian Ramdhani (2025). Hal tersebut menandakan bahwa penduduk dapat diasumsikan mencari zona tempat baru, yang tidak lagi disekitar wilayah industri yang sudah padat, yang telah menyebabkan penurunan sumber daya hutan untuk mendukung kehidupan. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian Anggriani et al. (2018) yang menunjukkan bahwa penduduk secara umum tinggal dekat dengan hutan untuk memenuhi kebutuhannya. Namun, ketika kepadatan industri tidak dapat dijaga maka sumberdaya hutan akan menurun (Ezeorah & Ekaka-A, 2022).

Kesimpulan

Penelitian ini dilakukan untuk memodifikasi model matematika dari penelitian terdahulu tentang penipisan sumber daya hutan. Penelitian dilakukan dengan penambahan suatu kendali, kendali industrialisasi oleh pemerintah yang disimbolkan dengan $\theta_0(t)$. Kendali tersebut ditambahkan ke kelas $B(t)$, $N(t)$, dan $I(t)$. Penelitian ini juga membentuk fungsi tujuan baru dengan mempertimbangkan kendali dan kepadatan sumber daya hutan. Pembahasan hasil penelitian menunjukkan bahwa suatu kendali industrialisasi optimal dapat dilakukan oleh pemerintah dalam menjaga sumber daya hutan. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa semakin tinggi kendali industrialisasi yang dilakukan oleh pemerintah maka kepadatan sumber daya hutan akan semakin terjaga bahkan terjadi kenaikan sumber daya hutan. Hal tersebut akan menghindarkan hutan dari penurunan atau kerusakan sumber daya yang pada akhirnya akan mendukung pencapaian SDGs 15 (ekosistem daratan). Penelitian ini menunjukkan hasil yang lebih baik dari penelitian terdahulu. Kondisi tersebut diketahui dari kepadatan sumber daya hutan yang menurun dan tidak mengalami kenaikan sedikitpun. Hasil penelitian ini memberikan penguatan dari sisi matematis untuk penelitian sebelumnya bahwa peran pemerintah dalam menjaga sumber daya hutan sangat penting dengan mengendalikan industrialisasi. Selanjutnya, kendali baru dalam penelitian ini dapat diaplikasikan pada model matematika untuk mencegah penurunan kesehatan masyarakat atau mencegah polusi udara, air dan tanah.

Daftar Pustaka

- Ahmadi, A., & Rahman, A. (2023). Pengawasan Pemerintah terhadap Pengawasan Hutan Sebagai Upaya Pencegahan Kerusakan Hutan untuk Lahan Pertanian (Studi Desa Selante Kec. Plampang Kab. Sumbawa). *Jurnal Private Law*, 3(1). 28-37. <https://doi.org/10.29303/prlw.v3i1.2134>

- Amir, M., Asriani, & Takdir, L. O. (2022). Strategi Pemerintah dalam Mencegah Illegal Logging di Kabupaten Muna Barat Provinsi Sulawesi Tenggara. *Jurnal Publicuho*, 5(3), 912–928. <https://doi.org/10.35817/publicuho.v5i3.40>
- Anggriani, I., Nurhayati, S., & Subchan, S. (2018). Analisis Kestabilan Model Penurunan Sumber Daya Hutan Akibat Industri. *Limits: Jurnal of Mathematics and Its Applications*, 15(1), 31-40. <https://dx.doi.org/10.12962%2Flimits.v15i1.3560>
- Bastiaansen, R., Doelman, A., Eppinga, M. B., & Rietkerk, M. (2020). The Effect of Climate Change on the Resilience of Ecosystems with Adaptive Spatial Pattern Formation. *Ecology Letters*, 23(3), 414–429. <https://doi.org/10.1111/ele.13449>
- Bhushan, S., & Sen, S. (2025). Assessing the Socio-spatial Effects of Forest Degradation in Kaimur Wildlife Sanctuary, Bihar, India. *Trees, Forests and People*, 20, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100882>
- BNPB. (2025). Info Bencana: Data dan Informasi Kebencanaan Bulanan Teraktual. In *BNPB* (Vol. 6, Number 12). <https://bnpb.go.id/storage/app/media/Buletin%20Info%20Bencana/2025%20Buletin%20Info%20Bencana/2025%20Juli/Buletin%20Info%20Bencana%20Juli%202025.pdf>
- Darmawan, L. S., Sarkawi, S., & Fallahiyan, M. A. (2025). Peran Pemerintah Desa dalam Pengelolaan Hutan Kemasyarakatan di Desa Bayan. *Jurnal Diskresi*, 4(2), 362–375. <https://doi.org/10.29303/962g9673>
- Ezeorah, J., & Ekaka-A, E. N. (2022). Modelling the Effect of Depletion Rate of Forestry Resources due to Industrialization on the Effect of Population and Population Augmented Industrialization on Forestry Resources. *Jurnal of Applied & Computational Mathematics*, 11(6), 4–7. <https://doi.org/10.37421/2168-9679.2022.11.477>
- Hiratsuka, M., Nakama, E., Satriadi, T., Fauzi, H., Aryadi, M., & Morikawa, Y. (2019). An Approach to Achieve Sustainable Development Goals through Participatory Land and Forest Conservation: a Case Study in South Kalimantan Province, Indonesia. *Jurnal of Sustainable Forestry*, 38(6), 558–571. <https://doi.org/10.1080/10549811.2019.1598440>
- Hou, L., Gao, S., Chang, L., Wu, Y., Feng, G., Wang, Z., & Sun, G. (2025). Vegetation Restoration Strategies in Arid or Semi-arid Regions—From the Perspective of Optimal Control. *Chaos*, 34(11). <https://doi.org/10.1063/5.0206880>
- Hou, L., Li, L., Chang, L., Wang, Z., & Sun, G. (2025). Pattern Dynamics of Vegetation Based on Optimal Control Theory. *Nonlinear Dyn*, 113, 1–23. <https://doi.org/10.1007/s11071-024-10241-6>
- Jamal, M. K., Sanaei, B., Naderi, M., Past, V., Abadi, S. H. A., Khazaei, R., Esmaeili, A., Sadrizadeh, S., Moghimi, S., & Ghiyasi, Z. (2025). Investigating the Recent Outbreak of Dengue Fever in Iran : a Systematic Review. *The Egyptian Jurnal of Internal Medicine*. <https://doi.org/10.1186/s43162-025-00411-2>
- Jatav, S., Sundar, S., & Malviya, A. (2025). A Mathematical Model for Degradation of

- Forest Area by Industrialization Causing Migration of Wildlife Species. *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 30(5), 874–891. <https://doi.org/10.15388/NAMC.2025.30.42247>
- Jha, A., & Misra, A. K. (2025). Analyzing the Synergistic Effects of Population and Pollution on Forest Resources: A Mathematical Model. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 35(05), 2550057. <https://doi.org/10.1142/S0218127425500579>
- Jang, X., Zhou, H., Zhang, Y., Tian, H., Diao, G., & Shang, D. (2025). Does Forestry Industry Development Enhance Forest Resource Sustainability? An Examination Based on Forestry Industry Complexity. *Forests*, 16(4). <https://doi.org/10.3390/f16040602>
- Lenhart, S., & Workman, J. T. (2007). Optimal Control Applied to Biological Models. In *Optimal Control Applied to Biological Models*. New York: Chapman and Hall/ CRC. <https://doi.org/10.1201/9781420011418>
- Liu, T., Yu, L., Yan, Z., Li, X., Bu, K., & Yang, J. (2025). Enhanced Climate Mitigation Feedbacks by Wetland Vegetation in Semi-Arid Compared to Humid Regions. *Geophysical Research Letters*, 52(9), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2025GL115242>
- Lyons-White, J., Spencer, M., Arif, J., Balmford, A., Barlow, J., Brandão, J., Börner, J., Camara, G., Chandra, A., Cleary, D., Colchester, M., Dharmawan, A. H., Ekaputri, A. D., Grabs, J., Hecht, S., Idris, N., Juniyan, L., Kumaran, S., Lasmana, F. P. S., Macedo, M. N., McGrath, T., Nawawi, N., Nussbaum, R., Paranhos, M., Pollard, E., Porro, R., dos Reis, J. C., Smith, R. E., Struebig, M. J., Turner, E. C., Utamiputri, P., Valentim, J. F., & Garrett, R. D. (2025). Political Will Has Been Critical for Protecting Forests in the Brazilian Amazon and Indonesia. *Conservation Letters*, 18(4), 1–9. <https://doi.org/10.1111/conl.13120>
- Ma, Z., Hu, C., Huang, J., Li, T., & Lei, J. (2022). Forests and Forestry in Support of Sustainable Development Goals (SDGs): A Bibliometric Analysis. *Forests*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/f13111960>
- Ngoh, D. M., Jha, A., Bring, Misra, A. K., Ngangue, D.-P. M., & Fono, L. A. (2025). Impact of Human Activities and Forest Biomass on Atmospheric Carbon Dioxide: A Mathematical Model. *Environmental Modeling & Assessment*, 30(5), 947–962. <https://doi.org/10.1007/s10666-025-10038-w>
- Ramdhani, V. (2025). Analisis Kestabilan Model Penipisan Sumber Daya Hutan Dengan Mempertimbangkan Faktor Migrasi Penduduk. *Jurnal Derivat*, 12(1), 37–48. <https://doi.org/10.31316/j.derivat.v12i1.7202>
- Sarun, H. (2026). Assessment of Flooded Forest Degradation in the Tonlé Sap Floodplain, Cambodia. *Journal of Agriculture and Environment*, 3(3), 176–186. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19086953>
- Suparto, S., Admiral, A., Ardiansyah, A., & Namazovna, S. D. (2025). The Concept of State Control over Forests and Forest Areas in Indonesia. *Journal of Law*,



Environmental and Justice, 3(2), 201–228.
[https:// doi.org/ 10.62264/ jlej.v3i2.136](https://doi.org/10.62264/jlej.v3i2.136)

Wula, H. V. M., Fkun, E., Maniagasi, Y. G., Kalembang, E., & Kolne, Y. (2024). Upaya Pemerintah Desa dalam Pelestarian Hutan. *Kaganga: Jurnal Pendidikan Sejarah dan Riset Sosial Humaniora*, 7(2), 1566–1573.
[https:// doi.org/ 10.31539/ kaganga.v7i2.10021](https://doi.org/10.31539/kaganga.v7i2.10021)

Youlistia, D. E., Sabrina, S., Serli, S., Putri, D. F., & Amijaya, F. D. T. (2025). Pewarnaan Graf dengan Algoritma Welch-Powell untuk Optimalisasi Pengelolaan Sumber Daya Alam di Hutan Tropis. *MILANG Journal of Mathematics and Its Applications*, 21(1), 61–66. [https:// doi.org/ 10.29244/ milang.21.1.61-66](https://doi.org/10.29244/milang.21.1.61-66)