

MODEL PENGELOLAAN BERKELANJUTAN KAWASAN MANGROVE BERBASIS SISTEM DINAMIK UNTUK MENDUKUNG KETAHANAN EKOSISTEM PESISIR KABUPATEN INDRAMAYU

Sodikin¹

¹Program Studi Magister Studi Lingkungan, Sekolah Pascasarjana Universitas Terbuka, Tangerang Selatan, Indonesia

*Corresponding author: sodikinn@ecampus.ut.ac.id

Abstrak

Ekosistem mangrove Kabupaten Indramayu menghadapi tekanan akibat perubahan penggunaan lahan, aktivitas antropogenik, dan perubahan iklim yang berpotensi menurunkan fungsi ekologis dan ketahanan pesisir. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model pengelolaan berkelanjutan berbasis *System Dynamics* dengan mengintegrasikan konservasi, rehabilitasi, *blue carbon*, partisipasi masyarakat, dan adaptasi perubahan iklim. Data penginderaan jauh, survei lapangan, data lingkungan, dan data sekunder digunakan untuk membangun dan mengkalibrasi model. Simulasi dilakukan pada periode 2025–2050 menggunakan empat skenario, yaitu *Business as Usual*, *Conservation*, *Rehabilitation*, dan *Integrated Sustainable Management*. Hasil menunjukkan bahwa skenario *Rehabilitation* menghasilkan luas mangrove dan stok karbon tertinggi pada 2050, masing-masing 2.103,70 ha dan 848.906,06 t C. Namun, *Integrated Sustainable Management* memberikan strategi paling komprehensif untuk meningkatkan ketahanan ekosistem pesisir secara berkelanjutan.

Kata Kunci: Mangrove; System Dynamics; Blue carbon; Rehabilitasi; Ketahanan pesisir.

Abstract

Mangrove ecosystems in Indramayu Regency face increasing pressure from land-use change, anthropogenic activities, and climate change, potentially reducing their ecological functions and coastal resilience. This study aims to develop a sustainable mangrove management model using a System Dynamics approach by integrating conservation, rehabilitation, blue carbon, community participation, and climate change adaptation. Remote sensing data, field observations, environmental data, and secondary data were used to develop and calibrate the model. Simulations were conducted for 2025–2050 using four scenarios: Business as Usual, Conservation, Rehabilitation, and Integrated Sustainable Management. The results show that the Rehabilitation scenario produced the highest mangrove area and carbon stock by 2050, reaching 2,103.70 ha and 848,906.06 t C, respectively. However, Integrated Sustainable Management provides the most comprehensive strategy for strengthening long-term coastal ecosystem resilience.

Keywords: Mangrove; System Dynamics; blue carbon; rehabilitation; coastal resilience.

1. PENDAHULUAN

Ekosistem mangrove merupakan salah satu ekosistem pesisir yang memiliki peran penting dalam menjaga stabilitas lingkungan, melindungi garis pantai, menyediakan habitat bagi berbagai biota, serta menyimpan karbon dalam biomassa dan sedimen (Lovelock, 2024., Elayi, 2026). Selain berfungsi sebagai pelindung alami terhadap abrasi dan gelombang, mangrove juga memiliki kontribusi penting terhadap mitigasi perubahan iklim melalui mekanisme *blue carbon* (Dinakarkumar, 2026). Namun, keberlanjutan ekosistem ini menghadapi tekanan yang semakin kompleks akibat perubahan penggunaan lahan, ekspansi tambak, aktivitas permukiman dan ekonomi pesisir, serta perubahan iklim yang ditandai oleh kenaikan muka

laut dan perubahan dinamika garis pantai. Oleh karena itu, pengelolaan mangrove perlu diarahkan tidak hanya pada peningkatan luas tutupan, tetapi juga pada penguatan fungsi ekologis, karbon, sosial, dan ketahanan pesisir.

Kabupaten Indramayu merupakan salah satu wilayah pesisir di pantai utara Jawa yang memiliki ekosistem mangrove dengan dinamika perubahan yang cukup tinggi. Analisis multitemporal menunjukkan bahwa luas mangrove Indramayu berubah dari 1.443,74 ha pada 1991 menjadi 833,07 ha pada 2001, kemudian relatif stabil sebesar 844,24 ha pada 2011, dan meningkat menjadi 1.521,27 ha pada 2021 (Fathimatuz, 2026). Perubahan tersebut menunjukkan adanya periode degradasi yang kuat sekaligus kemampuan pemulihan ekosistem setelah adanya berbagai intervensi pengelolaan. Meskipun terjadi peningkatan luas mangrove, kondisi pesisir Indramayu masih menghadapi dinamika abrasi dan akresi (Kusnanto, 2022). Perubahan garis pantai tidak hanya dipengaruhi oleh keberadaan mangrove, tetapi juga oleh gelombang, arus, pasang surut, sedimentasi, perubahan penggunaan lahan, dan aktivitas manusia (Dewi, 2020., Aliyuddin, 2019). Selain aspek perlindungan pantai, mangrove Indramayu memiliki potensi penting sebagai penyimpan karbon. Studi pada RPH Cemara, KPH Indramayu, memperkirakan stok karbon sekitar 911.506,65 ton C pada area 1.365 ha, dengan sebagian besar karbon tersimpan pada tanah (Ati, 2024). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa konservasi dan rehabilitasi mangrove dapat memberikan manfaat ganda, yaitu meningkatkan ketahanan pesisir sekaligus mendukung mitigasi perubahan iklim melalui peningkatan carbon storage dan carbon sequestration.

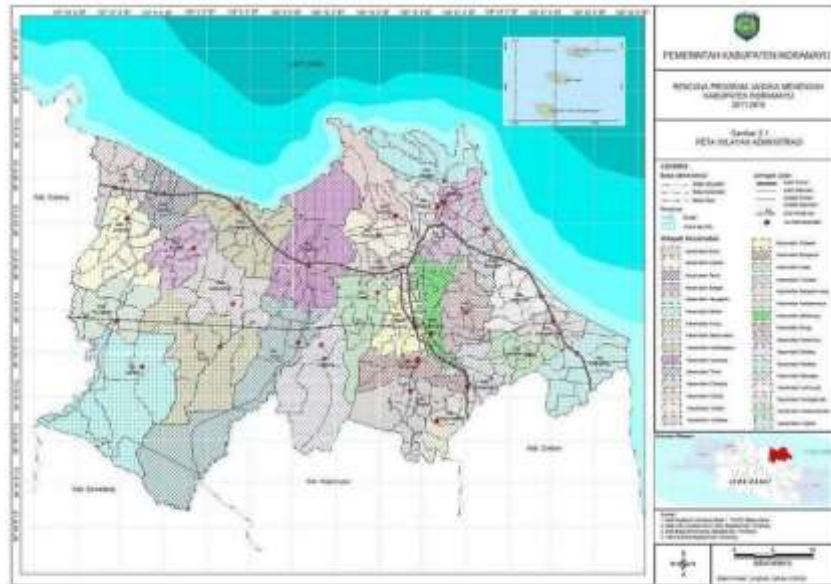
Permasalahan pengelolaan mangrove menjadi semakin kompleks karena keberhasilan rehabilitasi tidak hanya ditentukan oleh luas area penanaman, tetapi juga oleh kesesuaian lokasi, tingkat kelangsungan hidup tanaman, regenerasi alami, tekanan antropogenik, serta efektivitas kelembagaan dan partisipasi masyarakat. Hubungan antarvariabel tersebut membentuk sistem yang dinamis, memiliki umpan balik, dan berlangsung dalam jangka panjang. Pendekatan pengelolaan yang hanya berorientasi pada pemetaan perubahan atau rehabilitasi secara sektoral belum mampu menggambarkan konsekuensi jangka panjang dari berbagai alternatif kebijakan (Coelho, 2020).

Sistem Dynamics dapat digunakan untuk mengatasi keterbatasan tersebut karena mampu merepresentasikan hubungan sebab-akibat, *feedback loops*, stock-flow, dan perubahan sistem dari waktu ke waktu. Melalui pendekatan ini, dinamika luas mangrove dapat dihubungkan dengan rehabilitasi, konservasi, tekanan antropogenik, stok karbon, manfaat ekosistem, dan ketahanan pesisir. Model juga memungkinkan pengujian berbagai alternatif kebijakan sebelum diterapkan di lapangan (Teeuwen, 2022). Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan Model Pengelolaan Berkelanjutan Kawasan Mangrove Berbasis Sistem Dinamik untuk Mendukung Ketahanan Ekosistem Pesisir Kabupaten Indramayu: Integrasi Konservasi, Rehabilitasi, Blue Carbon, dan Adaptasi Perubahan Iklim. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi analisis perubahan mangrove berbasis penginderaan jauh dengan System Dynamics untuk menguji secara simultan trade-off antara konservasi, rehabilitasi, blue carbon, partisipasi masyarakat, dan adaptasi perubahan iklim.

2. METODE

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di kawasan pesisir Kabupaten Indramayu, Provinsi Jawa Barat, Indonesia, dengan fokus pada kawasan yang memiliki ekosistem mangrove dan mengalami tekanan perubahan penggunaan lahan serta dinamika garis pantai. Analisis spasial mencakup seluruh kawasan pesisir Indramayu. Lokasi penelitian seperti disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1 Lokasi Penelitian

Bahan dan Alat Penelitian

Bahan penelitian meliputi data spasial, ekologis, sosial-ekonomi, dan data pendukung pemodelan. Data utama berupa citra Landsat dan Sentinel-2 untuk menganalisis perubahan tutupan mangrove hingga tahun 2024. Data spasial pendukung meliputi batas administrasi, garis pantai, jaringan sungai dan jalan, penggunaan lahan, elevasi, kemiringan lereng, serta karakteristik pesisir. Data iklim dan lingkungan mencakup curah hujan, suhu, kenaikan muka laut, serta informasi abrasi dan akresi. Data lapangan meliputi koordinat, jenis dan kerapatan mangrove, diameter dan tinggi pohon, regenerasi, kondisi substrat, serta keberhasilan rehabilitasi. Data sosial-ekonomi mencakup pemanfaatan kawasan, aktivitas masyarakat, dan kegiatan rehabilitasi. Data sekunder diperoleh dari BPS, KLHK/Kementerian Kehutanan, BIG, BMKG, pemerintah daerah, publikasi ilmiah, dan penelitian terdahulu.

Alat penelitian meliputi komputer atau laptop, GPS/GNSS untuk penentuan koordinat, dan kamera digital untuk dokumentasi lapangan. Pengolahan citra dan analisis spasial dilakukan menggunakan Google Earth Engine (GEE) dan perangkat lunak GIS, sedangkan pemodelan *System Dynamics* menggunakan Powersim Studio. Perangkat lunak statistik digunakan untuk analisis dan validasi model, sementara spreadsheet digunakan untuk pengelolaan data dan parameter simulasi.

Teknik Pengumpulan Data

Data Penginderaan Jauh

Data penginderaan jauh dikumpulkan untuk memperoleh informasi perubahan spasial-temporal kawasan mangrove. Citra Landsat digunakan untuk merekonstruksi kondisi historis,

sedangkan Sentinel-2 digunakan untuk memperoleh informasi kondisi mangrove yang lebih mutakhir hingga tahun 2024. Citra diproses melalui koreksi atmosfer, masking awan, penyusunan komposit citra, dan pemotongan berdasarkan batas kawasan penelitian.

Identifikasi mangrove dilakukan dengan memanfaatkan karakteristik spektral vegetasi dan indeks seperti NDVI, NDWI, dan MNDWI, kemudian dilanjutkan dengan klasifikasi tutupan lahan menggunakan algoritma Random Forest. Hasil klasifikasi digunakan untuk memperoleh luas dan distribusi spasial mangrove pada setiap tahun pengamatan.

Survei Lapangan

Survei lapangan dilakukan untuk memperoleh data referensi dan melakukan validasi hasil klasifikasi citra. Lokasi pengamatan dipilih secara stratified purposive sampling berdasarkan kelas kerapatan mangrove, kondisi kawasan, dan tingkat tekanan antropogenik.

Pada setiap lokasi dilakukan pencatatan jenis mangrove, jumlah individu, diameter batang, tinggi vegetasi, kondisi regenerasi, kondisi substrat, serta koordinat geografis. Dokumentasi foto dan informasi mengenai aktivitas masyarakat, kondisi rehabilitasi, dan gangguan terhadap mangrove juga dikumpulkan. Data lapangan digunakan sebagai training sample dan validation sample dalam klasifikasi citra serta sebagai parameter ekologis untuk model System Dynamics.

Data Sekunder

Data sekunder dikumpulkan melalui publikasi ilmiah, laporan pemerintah, data statistik, dan basis data geospasial. Data tersebut meliputi luas mangrove historis, data perubahan garis pantai, data karbon mangrove, kegiatan rehabilitasi, perubahan penggunaan lahan, data kependudukan, aktivitas ekonomi pesisir, serta data perubahan iklim. Data historis digunakan untuk kalibrasi dan validasi model, sedangkan data sekunder ekologis dan sosial-ekonomi digunakan untuk menentukan nilai parameter dalam model.

Teknik Analisis Data

Analisis Perubahan Tutupan Mangrove

Luas mangrove dihitung dari hasil klasifikasi citra pada setiap periode pengamatan. Perubahan luas dihitung menggunakan:

$$\Delta M = M_t - M_{t-1}$$

sedangkan laju perubahan dihitung menggunakan:

$$R = \frac{M_t - M_{t-1}}{M_{t-1}} \times 100\%$$

Hasil analisis digunakan untuk mengidentifikasi periode kehilangan, stabilisasi, dan pemulihan mangrove.

Uji Akurasi Klasifikasi

Akurasi hasil klasifikasi diuji menggunakan confusion matrix, dengan indikator Overall Accuracy, Producer's Accuracy, User's Accuracy, dan Kappa Coefficient. Data validasi berasal dari hasil survei lapangan dan titik referensi yang independen dari data training.

Klasifikasi dianggap layak digunakan apabila menghasilkan tingkat akurasi yang memenuhi standar pemetaan tutupan lahan yang digunakan dalam penelitian.

Analisis Blue Carbon

Estimasi stok karbon dilakukan berdasarkan luas mangrove dan nilai carbon density yang diperoleh dari hasil pengukuran lapangan atau sumber literatur yang sesuai dengan karakteristik mangrove Indramayu.

Secara sederhana, stok karbon dihitung dengan:

$$C_{stock} = A_m \times C_d$$

dengan:

- C_{stock} = stok karbon (t C);
- A_m = luas mangrove (ha);
- C_d = densitas karbon (t C ha⁻¹).

Perubahan stok karbon antarperiode digunakan untuk mengestimasi perubahan kapasitas penyimpanan karbon dan kontribusi mangrove terhadap mitigasi perubahan iklim.

Pembangunan Model *System Dynamics*

Model *System Dynamics* dibangun menggunakan pendekatan Causal Loop Diagram (CLD) dan Stock-Flow Diagram (SFD) untuk menggambarkan hubungan dinamis antarvariabel yang memengaruhi keberlanjutan ekosistem mangrove di Kabupaten Indramayu. Model dikembangkan dengan mengintegrasikan beberapa subsistem yang saling berinteraksi, yaitu ekosistem mangrove, tekanan antropogenik, konservasi, rehabilitasi, *blue carbon*, partisipasi masyarakat, perubahan iklim, dan ketahanan pesisir. Luas kawasan mangrove digunakan sebagai stock utama yang mengalami perubahan dari waktu ke waktu. Penambahan luas mangrove dalam model direpresentasikan melalui *inflow* berupa keberhasilan rehabilitasi dan regenerasi alami, sedangkan pengurangan luas mangrove direpresentasikan melalui *outflow* berupa konversi lahan dan degradasi ekosistem. Perubahan luas mangrove selanjutnya memengaruhi kapasitas penyimpanan karbon, fungsi perlindungan pesisir, manfaat ekosistem, dan tingkat ketahanan pesisir. Pada saat yang sama, tekanan antropogenik, efektivitas konservasi, keberhasilan rehabilitasi, partisipasi masyarakat, serta tekanan perubahan iklim memengaruhi laju perubahan stock mangrove. Model tersebut digunakan untuk mensimulasikan dinamika ekosistem mangrove dan mengevaluasi berbagai alternatif kebijakan pengelolaan hingga tahun 2050.

Luas mangrove menjadi stock utama, sedangkan rehabilitasi dan regenerasi alami merupakan *inflow*. Konversi dan degradasi menjadi *outflow*.

Secara umum:

$$M_t = M_{t-1} + R_t + G_t - C_t - D_t$$

dengan:

- M = luas mangrove;
- R = rehabilitasi berhasil;
- G = regenerasi alami;
- C = konversi;
- D = degradasi.

Model juga memasukkan hubungan antara luas mangrove dan stok karbon, jasa ekosistem, serta ketahanan pesisir.

Kalibrasi dan Validasi Model

Kalibrasi dilakukan dengan menyesuaikan parameter model berdasarkan data observasi historis. Dalam penelitian ini, data perubahan mangrove hingga 2024 digunakan untuk menguji kemampuan model dalam merepresentasikan dinamika historis.

Validasi dilakukan dengan membandingkan nilai hasil simulasi dengan nilai observasi menggunakan indikator Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), dan koefisien determinasi (R^2).

RMSE dihitung dengan:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (S_i - O_i)^2}{n}}$$

dengan S_i merupakan nilai simulasi dan O_i nilai observasi.

Model dianggap memiliki kinerja yang baik apabila perbedaan antara hasil simulasi dan data observasi relatif kecil serta mampu merepresentasikan pola perubahan historis.

Analisis Skenario

Model yang telah dikalibrasi digunakan untuk melakukan simulasi pengelolaan mangrove Kabupaten Indramayu selama periode 2025–2050 melalui empat skenario kebijakan sebagai berikut.

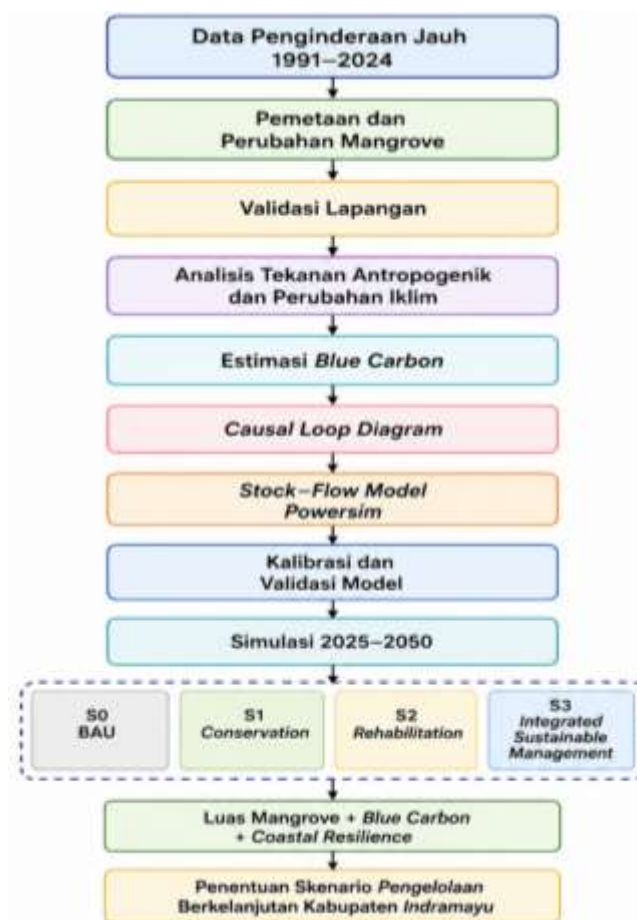
Tabel 1 Skenario Simulasi Model

Kode	Skenario	Deskripsi Intervensi
S0	Business as Usual (BAU)	Menggambarkan kondisi apabila tren tekanan antropogenik dan kebijakan pengelolaan berlangsung seperti kondisi saat ini tanpa tambahan intervensi yang signifikan.
S1	Conservation	Mengutamakan perlindungan mangrove eksisting, pengendalian konversi lahan, peningkatan pengawasan kawasan, dan penguatan fungsi kawasan konservasi.
S2	Rehabilitation	Mengutamakan rehabilitasi mangrove secara intensif pada lokasi yang sesuai dengan mempertimbangkan

		kesesuaian biofisik, tingkat keberhasilan penanaman, pemeliharaan, dan regenerasi alami.
S3	<i>Integrated Sustainable Management (ISM)</i>	Mengintegrasikan konservasi, rehabilitasi, partisipasi masyarakat, pengelolaan <i>blue carbon</i> , adaptasi perubahan iklim, serta pengendalian tekanan antropogenik dalam satu strategi pengelolaan terpadu.

Analisis Sensitivitas dan Ketahanan Pesisir

Analisis sensitivitas dan ketahanan pesisir dilakukan secara terpadu untuk mengevaluasi pengaruh perubahan parameter model serta kemampuan ekosistem mangrove dalam mempertahankan dan memulihkan fungsi ekologisnya. Analisis sensitivitas menguji parameter utama, meliputi laju konversi dan degradasi, luas dan keberhasilan rehabilitasi, regenerasi alami, tekanan perubahan iklim, *carbon density*, efektivitas konservasi, dan partisipasi masyarakat. Hasilnya digunakan untuk mengidentifikasi leverage variables, yaitu variabel yang paling berpengaruh terhadap luas mangrove, stok karbon, dan ketahanan pesisir. Selanjutnya, ketahanan pesisir dianalisis berdasarkan luas dan kondisi mangrove, kehilangan dan rehabilitasi, stok karbon, perubahan garis pantai, tekanan antropogenik, serta kemampuan pemulihan ekosistem. Hasil kedua analisis tersebut digunakan untuk membandingkan kinerja S0–BAU, S1–Conservation, S2–Rehabilitation, dan S3–Integrated Sustainable Management serta menentukan skenario pengelolaan paling efektif hingga tahun 2050.



Gambar 2 Tahapan Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dinamika Luasan Mangrove Kabupaten Indramayu

Hasil analisis multitemporal menunjukkan bahwa ekosistem mangrove di Kabupaten Indramayu mengalami perubahan yang cukup dinamis selama periode pengamatan. Mangrove tersebut tersebar terutama di Kecamatan Kandanghaur, Losarang, Cantigi, Pasekan, dan Indramayu. Lebih detail seperti terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perubahan luas mangrove Kabupaten Indramayu

Tahun	Luas Mangrove (ha)	Perubahan (ha)	Perubahan (%)
1991	1.443,74	–	–
2001	833,07	–610,67	–42,30
2011	844,24	+11,17	+1,34
2021	1.521,27	+677,03	+80,20
2024	1.123,20	–398,07*	–26,17*

Berdasarkan Tabel 2, dinamika mangrove Indramayu menunjukkan pola yang tidak linear. Penurunan tajam pada 1991–2001 terutama berkaitan dengan konversi mangrove menjadi tambak dan penggunaan lahan lainnya, sedangkan peningkatan pada 2011–2021 menunjukkan adanya pemulihan yang berkaitan dengan program rehabilitasi dan pengelolaan mangrove. Perubahan luas mangrove merupakan hasil interaksi antara penambahan dan kehilangan vegetasi, bukan semata-mata akibat kegiatan penanaman. Oleh karena itu, dalam model *System Dynamics*, luas mangrove direpresentasikan sebagai *stock* yang dipengaruhi oleh *inflow* dan *outflow*, seperti penanaman, rehabilitasi, regenerasi, degradasi, dan konversi lahan (Utami, 2022; Anh, 2024). Tahun 2024 digunakan sebagai *baseline* dengan luas mangrove 1.123,20 ha, sedangkan periode 2025–2050 menjadi periode proyeksi. Kondisi rehabilitasi pada 2024 menunjukkan bahwa tutupan aktual di beberapa lokasi masih jauh di bawah target, sehingga luas penanaman tidak dapat langsung dianggap sebagai pertambahan luas mangrove. Keberhasilan rehabilitasi perlu mempertimbangkan kesesuaian lokasi, tingkat kelangsungan hidup, pemeliharaan, dan regenerasi alami (Rivera-Monroy, 2022).

Struktur Stock–Flow Diagram Model Pengelolaan Mangrove

Model *Stock–Flow Diagram (SFD)* dikembangkan untuk menggambarkan hubungan dinamis antara ekosistem mangrove, stok karbon, sumber daya pesisir, dan aktivitas sosial-ekonomi. Model mencakup *stock*, *flow*, dan variabel pengendali, dengan luas mangrove, *carbon sink*, populasi, dan sumber daya perikanan sebagai komponen utama. Rehabilitasi, pertumbuhan alami, degradasi, aktivitas ekonomi, dan tekanan antropogenik menjadi faktor yang memengaruhi perubahan sistem. Struktur ini digunakan untuk mensimulasikan dinamika pengelolaan mangrove dan mengevaluasi berbagai skenario kebijakan hingga tahun 2050.

Proyeksi Stok Karbon Mangrove

Proyeksi stok karbon mangrove menunjukkan respons yang berbeda terhadap setiap skenario pengelolaan. Skenario BAU menghasilkan kecenderungan penurunan stok karbon, sedangkan skenario konservasi, rehabilitasi, dan pengelolaan terpadu menunjukkan peningkatan hingga tahun 2050, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Proyeksi stok karbon mangrove

Tahun	S0 – BAU (t C)	S1 – Conservation (t C)	S2 – Rehabilitation (t C)	S3 – ISM (t C)
2024	453.244,90	453.244,90	453.244,90	453.244,90
2030	376.372,43	479.474,35	523.176,64	509.698,74
2040	274.803,93	526.203,12	665.299,91	619.257,14
2050	198.496,41	577.168,96	848.906,06	752.543,10

Hasil simulasi menunjukkan bahwa perubahan luas mangrove secara langsung memengaruhi kapasitas penyimpanan karbon. Pada skenario BAU, stok karbon turun menjadi 198.496,41 t C pada 2050, atau mengalami penurunan sebesar 56,2% dari kondisi 2024. Sebaliknya, skenario rehabilitasi menghasilkan stok karbon tertinggi, yaitu 848.906,06 t C pada 2050. Sementara itu, skenario ISM menghasilkan 752.543,10 t C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rehabilitasi intensif memiliki potensi terbesar untuk meningkatkan *carbon storage*, tetapi strategi terpadu memberikan hasil yang cukup tinggi dengan pendekatan pengelolaan yang lebih beragam. Perbedaan stok karbon antarskenario menunjukkan bahwa kebijakan pengelolaan mangrove memiliki konsekuensi langsung terhadap fungsi mangrove sebagai ekosistem *blue carbon*. Dibandingkan baseline 2024, skenario S2 menghasilkan tambahan stok sekitar 395.661,16 t C, sedangkan S3 menghasilkan tambahan sekitar 299.298,20 t C pada 2050.

Sebaliknya, S0 menunjukkan kehilangan stok karbon sekitar 254.748,49 t C. Dengan faktor konversi 44/12, kehilangan tersebut secara teoritis ekuivalen dengan sekitar 934 ribu tCO₂e. Angka tersebut menunjukkan bahwa degradasi mangrove bukan hanya persoalan kehilangan habitat, tetapi juga berpotensi mengurangi kapasitas ekosistem dalam menyimpan karbon. Temuan ini memperkuat pentingnya memasukkan *blue carbon* dalam model pengelolaan mangrove. Pendekatan yang hanya menggunakan luas tutupan sebagai indikator keberhasilan belum sepenuhnya menggambarkan manfaat ekologis dan iklim yang dihasilkan. Dalam konteks kebijakan, peningkatan luas mangrove perlu diikuti dengan peningkatan kualitas dan keberlanjutan tegakan sehingga fungsi penyimpanan karbon dapat dipertahankan dalam jangka panjang. Temuan tersebut penting bagi interpretasi model. Mangrove merupakan salah satu komponen dalam sistem pesisir, tetapi bukan satu-satunya faktor yang menentukan ketahanan pantai (Ellison, 2021, Jayson-Quashigah, 2025). Kondisi gelombang, sedimentasi, pasang surut, geomorfologi, kenaikan muka laut, penggunaan lahan, dan tekanan antropogenik juga berperan. Oleh karena itu, S3–Integrated Sustainable Management memiliki keunggulan konseptual dibandingkan S2 karena tidak hanya berorientasi pada peningkatan luas mangrove, tetapi juga mengurangi tekanan kehilangan, meningkatkan keberhasilan rehabilitasi, melibatkan masyarakat, mempertahankan fungsi *blue carbon*, dan memperkuat adaptasi terhadap perubahan iklim.

Perbandingan Kinerja Empat Skenario

Perbandingan kinerja keempat skenario menunjukkan respons yang berbeda terhadap strategi pengelolaan mangrove hingga tahun 2050. Perbedaan tersebut mencakup luas mangrove, perubahan stok karbon, serta tingkat konservasi, rehabilitasi, dan partisipasi masyarakat sebagaimana disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Ringkasan hasil simulasi tahun 2050

Indikator	S0 – BAU	S1 Conservation	S2 Rehabilitation	S3 – ISM
Luas mangrove (ha)	491,90	1.430,30	2.103,70	1.864,90
Perubahan luas	-56,2%	+27,3%	+87,3%	+66,0%
Stok karbon (t C)	198.496,41	577.168,96	848.906,06	752.543,10
Perubahan stok karbon	-56,2%	+27,3%	+87,3%	+66,0%
Konservasi	Rendah	Tinggi	Sedang	Tinggi
Rehabilitasi	Rendah	Sedang	Sangat tinggi	Tinggi
Partisipasi masyarakat	Rendah	Sedang	Sedang	Tinggi
Blue carbon	Rendah	Sedang	Tinggi	Tinggi
Adaptasi perubahan iklim	Rendah	Sedang	Sedang	Tinggi
Ketahanan ekosistem	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat tinggi

Tabel 5 menunjukkan adanya perbedaan yang jelas dalam kinerja keempat skenario pengelolaan mangrove Kabupaten Indramayu pada tahun 2050. Perbedaan tersebut terutama terlihat pada luas mangrove, stok karbon, tingkat konservasi, intensitas rehabilitasi, partisipasi masyarakat, serta kapasitas adaptasi terhadap perubahan iklim. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa pendekatan Business as Usual (S0) menghasilkan kondisi paling tidak menguntungkan, sedangkan intervensi pengelolaan pada S1, S2, dan S3 mampu mempertahankan atau meningkatkan kondisi ekosistem mangrove. Pada skenario S0–Business as Usual, luas mangrove diproyeksikan menurun dari 1.123,20 ha pada tahun 2024 menjadi hanya 491,90 ha pada 2050, atau berkurang sebesar 56,2%. Penurunan luas tersebut diikuti oleh penurunan stok karbon dari 453.244,90 t C menjadi 198.496,41 t C. Kondisi ini menunjukkan bahwa apabila tekanan antropogenik, konversi lahan, dan degradasi berlangsung tanpa intervensi tambahan, ekosistem mangrove akan mengalami penurunan fungsi ekologis secara signifikan. Rendahnya tingkat konservasi, rehabilitasi, partisipasi masyarakat, dan adaptasi perubahan iklim pada skenario ini semakin memperbesar risiko terjadinya degradasi ekosistem.

Skenario S1–Conservation menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan BAU. Perlindungan mangrove eksisting dan pengendalian konversi mampu meningkatkan luas mangrove menjadi 1.430,30 ha pada 2050, atau meningkat 27,3% dibandingkan kondisi baseline. Stok karbon juga meningkat menjadi 577.168,96 t C. Hasil ini menunjukkan bahwa pengurangan laju kehilangan mangrove merupakan salah satu strategi penting dalam mempertahankan *stock* ekosistem. Dengan demikian, konservasi tidak hanya berfungsi mempertahankan tutupan mangrove yang ada, tetapi juga menjaga kapasitas penyimpanan karbon dan fungsi perlindungan pesisir (Macreadie, 2021).

Skenario S2–Rehabilitation menghasilkan kinerja tertinggi berdasarkan indikator luas mangrove dan stok karbon. Luas mangrove diproyeksikan mencapai 2.103,70 ha pada 2050, atau meningkat sebesar 87,3% dari kondisi 2024. Peningkatan luas tersebut menghasilkan stok karbon sebesar 848.906,06 t C. Hasil ini menunjukkan bahwa rehabilitasi intensif dapat menjadi instrumen yang sangat efektif untuk mempercepat pemulihan kawasan mangrove. Namun, hasil tersebut perlu ditafsirkan secara hati-hati karena keberhasilan rehabilitasi dalam kondisi nyata sangat dipengaruhi oleh kesesuaian lokasi, kondisi hidrologi, tingkat kelangsungan hidup tanaman, pemeliharaan, serta kemampuan regenerasi alami. Oleh karena itu, peningkatan luas rehabilitasi tidak dapat dipandang semata-mata berdasarkan jumlah bibit atau luas penanaman, tetapi harus dikaitkan dengan tingkat keberhasilan pemulihan ekosistem.

Sementara itu, S3–Integrated Sustainable Management (ISM) menghasilkan luas mangrove sebesar 1.864,90 ha dan stok karbon sebesar 752.543,10 t C pada tahun 2050. Meskipun nilai tersebut lebih rendah dibandingkan S2, S3 memiliki keunggulan karena mengintegrasikan berbagai komponen pengelolaan, yaitu konservasi, rehabilitasi, partisipasi masyarakat, *blue carbon*, adaptasi perubahan iklim, dan pengendalian tekanan antropogenik. Dengan demikian, S3 tidak semata-mata mengejar peningkatan luas mangrove, tetapi berupaya membangun mekanisme pengelolaan yang mampu mempertahankan keberlanjutan ekosistem dalam jangka panjang. Perbandingan menunjukkan bahwa S2–Rehabilitation paling efektif dalam meningkatkan luas mangrove dan stok karbon, sedangkan S3–Integrated Sustainable Management memberikan pendekatan yang lebih komprehensif dengan mengintegrasikan konservasi, rehabilitasi, partisipasi masyarakat, *blue carbon*, dan adaptasi perubahan iklim. Dengan demikian, S3 dipandang sebagai strategi jangka panjang yang lebih berkelanjutan, sementara S2 dapat menjadi komponen utama rehabilitasi. Pendekatan terpadu tersebut diharapkan mampu meningkatkan stok karbon sekaligus memperkuat ketahanan ekosistem pesisir Kabupaten Indramayu hingga 2050.

4. SIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa ekosistem mangrove Kabupaten Indramayu mengalami dinamika yang kuat akibat interaksi antara tekanan antropogenik, konservasi, rehabilitasi, regenerasi alami, dan perubahan iklim. Dengan luas mangrove baseline tahun 2024 sebesar 1.123,20 ha dan estimasi stok karbon sebesar 453.244,90 t C, hasil simulasi System Dynamics menunjukkan bahwa skenario Business as Usual (S0) menghasilkan kondisi paling tidak menguntungkan, dengan luas mangrove diproyeksikan menurun menjadi 491,90 ha dan stok karbon menjadi 198.496,41 t C pada 2050. Sebaliknya, skenario Rehabilitation (S2) menghasilkan capaian tertinggi, yaitu luas mangrove 2.103,70 ha dan stok karbon 848.906,06 t C. Sementara itu, Integrated Sustainable Management (S3) menghasilkan luas mangrove 1.864,90 ha dan stok karbon 752.543,10 t C. Dengan demikian, S2 paling efektif dalam meningkatkan luas mangrove dan stok karbon, sedangkan S3 memberikan pendekatan yang lebih komprehensif untuk mendukung keberlanjutan dan ketahanan ekosistem pesisir.

Implikasi kebijakan dari hasil penelitian menunjukkan bahwa pengelolaan mangrove Kabupaten Indramayu sebaiknya diarahkan pada pendekatan Integrated Sustainable Management (S3), dengan rehabilitasi sebagai salah satu komponen utama. Strategi tersebut perlu mengintegrasikan perlindungan mangrove eksisting, pengendalian konversi dan degradasi, rehabilitasi pada lokasi yang sesuai, peningkatan keberhasilan dan pemeliharaan tanaman, regenerasi alami, pengelolaan *blue carbon*, partisipasi masyarakat, serta adaptasi perubahan iklim. Pendekatan ini lebih sesuai untuk pengelolaan jangka panjang karena tidak hanya mengejar peningkatan luas mangrove, tetapi juga mempertahankan fungsi ekologis dan kapasitas penyimpanan karbon.

Meskipun demikian, model memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil. Estimasi stok karbon masih menggunakan asumsi carbon density sehingga belum sepenuhnya menggambarkan variasi densitas karbon secara spasial. Parameter rehabilitasi juga masih bergantung pada asumsi mengenai luas intervensi dan tingkat keberhasilannya, sedangkan kondisi aktual dapat dipengaruhi oleh kesesuaian lokasi, hidrologi, kelangsungan hidup tanaman, pemeliharaan, dan regenerasi alami. Selain itu, proyeksi hingga tahun 2050 memiliki ketidakpastian karena perubahan kondisi sosial-ekonomi, kebijakan, penggunaan lahan, dan perubahan iklim. Kualitas dan jumlah data lapangan juga masih menjadi faktor pembatas dalam kalibrasi dan validasi model. Indikator ketahanan pesisir yang digunakan juga belum sepenuhnya merepresentasikan seluruh faktor fisik pesisir, seperti gelombang, sedimentasi, pasang surut, geomorfologi, dan perubahan garis pantai.

Penelitian berikutnya perlu memperkuat model melalui peningkatan kualitas dan jumlah data lapangan, terutama data carbon density, biomassa, regenerasi alami, keberhasilan rehabilitasi, laju degradasi, dan perubahan garis pantai. Model juga perlu dikembangkan dengan memasukkan variasi carbon density secara spasial, analisis ketidakpastian dan sensitivitas parameter rehabilitasi, serta variabel perubahan iklim dan dinamika fisik pesisir secara lebih rinci. Pembaruan data dan kalibrasi model secara berkala diperlukan agar System Dynamics dapat menjadi alat pendukung keputusan yang lebih adaptif untuk perencanaan konservasi, rehabilitasi, pengelolaan blue carbon, dan penguatan ketahanan pesisir Kabupaten Indramayu hingga 2050.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Terbuka atas dukungan dan pendanaan yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Terima kasih juga disampaikan kepada Yayasan Lingkungan Hidup Estuari atas dukungan dan bantuan dalam proses pengumpulan data lapangan. Penghargaan turut disampaikan kepada Pemerintah Kabupaten Indramayu atas akses dan dukungan terhadap data yang diperlukan dalam penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, dan kontribusi selama proses penelitian hingga penyelesaian artikel ini.

6. DAFTAR RUJUKAN

- Aliyuddin, G., & Damayanti, A. (2019). Coastline changes in Serang City, Banten Province. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 248, 012062. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/248/1/012062>
- Anh, H. H., Tru, L. C., Van Trai, N., Da Hanh, T. M., & Van Cuong, N. (2024). Balancing economy and ecology: A system dynamics analysis of shrimp aquaculture and mangrove forest policy. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems*. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d12.0515>
- Ati, R. N. A., Khairunnisa, K., Rahayu, Y. P., Kusumaningtyas, M. A., Rustam, A., Suryono, D. D., Salim, H. L., Sudirman, N., Daulat, A., Purbani, D., Kepel, T., Adi, N. S., Zulfikar, A., & Hidayat, W. (2024). Biomass carbon stocks in conserved and rehabilitated mangroves of Indonesia: Case studies from Biduk-Biduk, Karimunjawa, Pati and Indramayu. *BIO Web of Conferences*, 134, 02003. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413402003>
- Coelho, C., Narra, P., Marinho, B., & Lima, M. (2020). Coastal management software to support the decision-makers to mitigate coastal erosion. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 37. <https://doi.org/10.3390/jmse8010037>
- Dewi, R. S., & Bijker, W. (2020). Dynamics of shoreline changes in the coastal region of Sayung, Indonesia. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2019.09.001>
- Dinakarkumar, Y., Selvam, M., Inayathullah, N., Pavithra, K., Mallikarjuna, H. N., Indhusuvitha, S., Jebacani, M. J., Romauld, S. I., & Mutezhilan, R. (2026). Mechanisms, processes, and implications of blue carbon sequestration and pollution control for climate change mitigation. *Discover Oceans*, 3. <https://doi.org/10.1007/s44289-026-00118-4>

- Elayi, M., Williams, S., & Joseph, S. (2026). Mangrove ecosystems as blue carbon sinks in mitigating rising global CO₂ emissions: A review study in India. *Current World Environment*. <https://doi.org/10.12944/cwe.21.1.4>
- Ellison, J. (2021). Factors influencing mangrove ecosystems. In *Mangroves: Ecology, biodiversity and management*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2494-0_4
- Fathimatuz, Z. N., Yudi, S., & Bahri, A. S. (2026). Mangrove land cover and coastline changes in Indramayu Regency in 1991–2021. *BIO Web of Conferences*, 220, 05012. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202622005012>
- Jayson-Quashigah, P.-N., Staneva, J., Chen, W., & Djath, B. (2025). Assessing the role of mangroves in shoreline stabilisation through a what-if modelling framework. *Discover Applied Sciences*, 7. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07623-9>
- Kusnanto, Setiawan, Y., & Nurjaya, I. (2022). Coastline changes in Indramayu Regency between 1989–2019. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, 12(3), 543–554. <https://doi.org/10.29244/jpsl.12.3.543-554>
- Lovelock, C., Bennion, V., De Oliveira, M., Hagger, V., Hill, J. W., Kwan, V., Pearse, A. L., Rossini, R. A., & Twomey, A. J. (2024). Mangrove ecology guiding the use of mangroves as nature-based solutions. *Journal of Ecology*, 112, 2510–2521. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14383>
- Macreadie, P., Costa, M. D. P., Atwood, T., Friess, D., Kelleway, J., Kennedy, H., Lovelock, C., Serrano, O., & Duarte, C. (2021). Blue carbon as a natural climate solution. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 826–839. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00224-1>
- Rivera-Monroy, H., Rez, L. O.-P. É., López-Portillo, J., Ferreira, T. O., Arifanti, V., Sidik, F., Mulyanto, B., Susilowati, A., Wahyuni, T., S., Yuniarti, N., Aminah, A., Suita, E., Karlina, E., Suharti, S., P., Turjaman, M., Hidayat, A., Rachmat, H., ... Novita, N. (2022). Challenges and strategies for sustainable mangrove management in Indonesia: A review. *Forests*, 13(5), 695. <https://doi.org/10.3390/f13050695>
- Teeuwen, A. S., Meyer, M. A., Dou, Y., & Nelson, A. (2022). A systematic review of the impact of food security governance measures as simulated in modelling studies. *Nature Food*, 3, 619–630. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00571-2>
- Utami, T. N., Fattah, M., & Iintyas, C. A. (2022). The system dynamic of mangrove ecotourism of “Kampung Blekok” Situbondo East Java Indonesia: Economic and ecological dimension. *Environmental Research, Engineering and Management*, 78(2). <https://doi.org/10.5755/j01.erem.78.2.30322>